

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

**Варламов Андрей Владимирович**

**Взаимодействие оптического излучения с акустическими волнами в  
волноводных структурах на подложках ниобата лития**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

---

*Код и наименование*

Направленность 03.06.01\_03 Радиофизика

---

*Код и наименование*

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Варламов Андрей  
Владимирович  
Научный руководитель: без звания,  
д. ф.-м. н., Шамрай Александр  
Валерьевич

Санкт Петербург – 2019\_

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/Зав.каф. : – *Величко Елена Николаевна* –  
кандидат наук

Научный руководитель: – *Шамрай Александр Валерьевич*  
– доктор физико-  
математических наук

Рецензент: – *Плешаков Иван Викторович* –  
доктор физико-математических  
наук,  
*ФТИ им. Иоффе РАН, ведущий  
научный сотрудник*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## **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 шумов 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 и частоты 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.

Данная работа посвящена исследованию взаимодействия акустических волн и колебаний с оптическим излучением. В одних случаях данное взаимодействие используется для создания акустооптических модуляторов в интегральном исполнении, в других случаях является дополнительным паразитным эффектом в электрооптических СВЧ модуляторах. НЛ является одним из базовых материалов акустооптики[4]. Кроме того, существует огромное количество работ посвященных исследованиям возбуждения в НЛ акустических волн и их взаимодействия с оптическим излучением. Отмечу, однако, что 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.

Все выше сказанное делает тему данной работы весьма актуальной, особенно в свете большого числа современных практических применений.

**Целью настоящей работы** является исследование возбуждения акустических колебаний и волн, их взаимодействия с электромагнитным

излучением в канальном оптическом волноводе на подложке ниобата лития, а также поиск методов повышения эффективности акустооптической модуляции и снижения уровня паразитных акустических воздействий, создающих шумы в оптическом сигнале.

**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 чипе ИЭОМ акустические колебания и их взаимодействие со светом, распространяющимся по оптическому волноводу;

– разработать методы подавления акустических колебаний в чипе 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 методы формирования и характеристики акустических волноводов на подложках НЛ X-среза;

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

– разработать методы пассивной и активной стабилизации, подавления и компенсации шумов 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 чипе ИЭОМ с использованием специальной формы чипа 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 шумов 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 оптимальная конфигурация интегральных акустооптических модуляторов на подложках НЛ Х-среза, обеспечивающая низкую мощность модулирующего ВЧ сигнала, стабильность характеристик модулятора и низкий уровень шумов в оптическом сигнале.

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

1. В ИЭОМ на подложках НЛ 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. Возбуждение паразитных акустических колебаний в двухканальных дифференциальных фазовых модуляторах на подложках НЛ 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 ВШП, изготовленный из алюминия на подложке НЛ Х-среза при увеличении числа штырей будет обеспечивать снижение эффективности возбуждения паразитной псевдо ПАВ за счет повышения частотной селективности.

4. Для оптических и акустических волноводов, изготовленных на подложках НЛ Х-среза в одном технологическом цикле с использованием метода термической диффузии титана существует максимальная ширина волноводного канала, соответствующая одномодовому режиму распространения, отсечке высших мод, которая при заданных толщине титановой пленки и времени отжига, определяется шириной титановой полоски (6 - 8 мкм) для оптического волновода и зазором между титановыми полями (50 - 70 мкм), формирующими оболочку акустического волновода.

5. Оптимальная конфигурация интегрального акустооптического модулятора на подложке НЛ Х-среза включает в себя одномодовые каналы оптический и акустический волноводы направленные вдоль оси  $Y$ , алюминиевый ВШП с количеством штырей более 40, повернутый на

компенсационный угол 5 градусов относительно направления волноводов, обеспечивает низкую (менее 100 мВт) мощность модулирующего ВЧ сигнала и компромисс между эффективностью акустооптического взаимодействия, шириной полосы модулирующих сигналов, стабильностью и восприимчивостью к изменению внешних условий.

**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).

**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 были подтверждены результатами обработки экспериментальных данных. Основные результаты исследований обсуждались на научных конференциях и публиковались в рецензируемых научных журналах.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ. Из них 4 публикации в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus. 2 публикации в журналах из перечня ВАК. 2 в иных изданиях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 98 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 5 таблиц, список цитированной литературы представлен 103 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 интегрально-оптических модуляторов на подложках НЛ. Более детально рассмотрены акустооптические модуляторы, в том числе в интегральном исполнении. Особое внимание уделено шумам 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 шумовым характеристикам. 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 канальные 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  $\pm 3$  градуса относительно оси  $Y$  и боковых граней подложки.

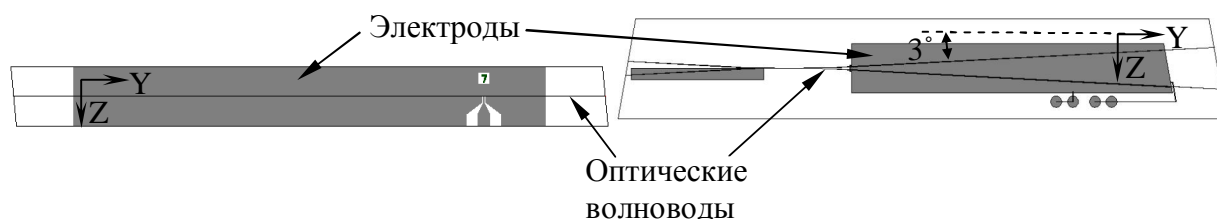


Рисунок 1 – Конфигурации ИЭОМ для исследования возбуждения паразитных акустических колебаний

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.

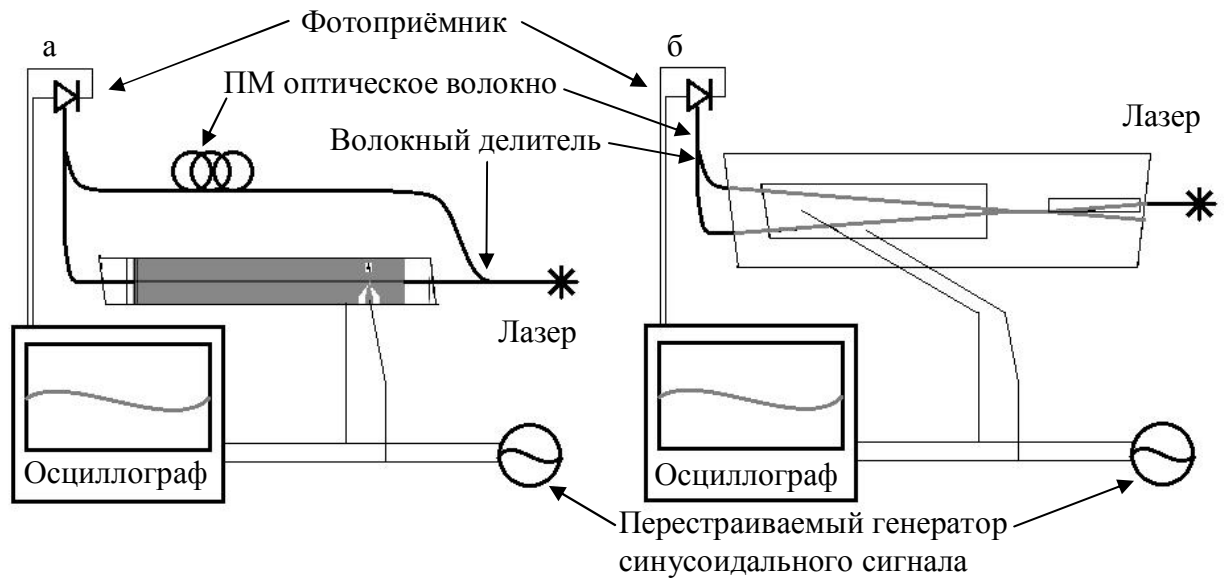


Рисунок 2 – Интерферометрическая схема измерения частотных зависимостей полуволнового напряжения фазовых ИЭОМ: (а) конфигурация 1, (б) конфигурация 2

Отдельно были проведены измерения частотных зависимостей импеданса электродов.

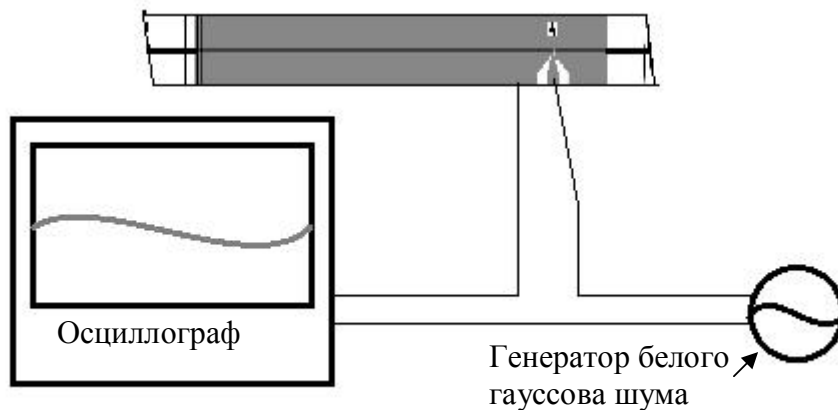


Рисунок 3 – Схема измерения частотных зависимостей импеданса электродов

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. 4). 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.

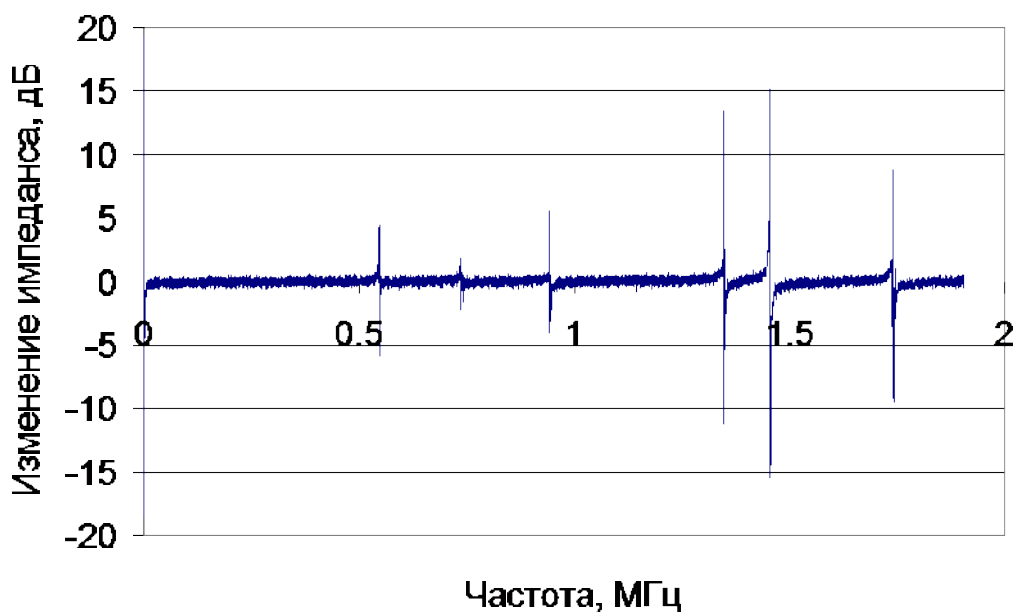


Рисунок 4. Резонансные пики собственных объемных акустических колебаний

Была разработана оригинальная методика для исследования пространственного распределения амплитуды акустических колебаний, основанная на адаптивной интерферометрии с использованием возбуждения нестационарной фотоЭДС [5]. Экспериментальная установка (Рис. 5) 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 кристаллического чипа исследуемого образца ИЭОМ. ИЭОМ был установлен на трехкоординатную микро-подвижку, обеспечивающую точное позиционирование и возможность сканирования сигнального луча по поверхности чипа 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.

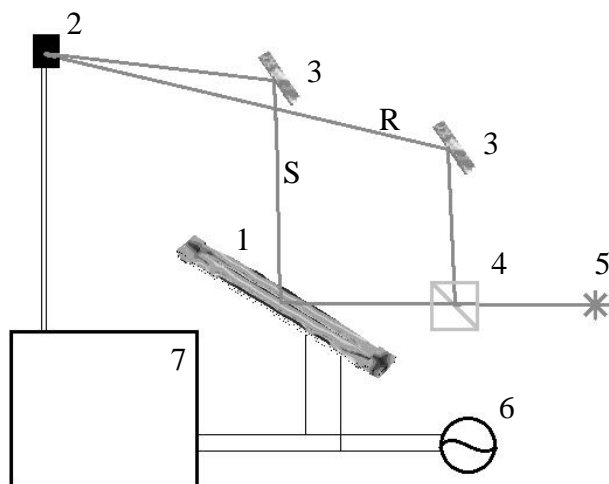


Рисунок 5 – Адаптивный интерферометр на основе нестационарной фотоЭДС (1 – образец, 2 – фотоприемник (GaAs), 3 – зеркала, 4 – светоделительный куб, 5 – лазер (532 нм, 200 мВт), 6, 7 – генератор синусоидального сигнала и селективный нановольтметр (синхронизированные по частоте), S, R – сигнальный и опорный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

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].

Использование синусоидального сигнала модуляции на электродах исследуемых образцов и синхронного детектирования сигнала нестационарной фотоЭДС обеспечивают высокую чувствительность предложенного метода. С помощью калибровки адаптивного интерферометра по амплитуде сигнала нестационарной фотоЭДС определялась амплитуда колебаний поверхности. Для проведения калибровки электроды ИЭОМ закорачивались, а в опорный луч устанавливался объемный фазовый модулятор (ячейка Поккельса) создающий модуляцию фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{V \cdot \pi}{V_{\pi}}, \quad (1)$$

где  $V$  – амплитуда калибровочного сигнала,  $V_{\pi}=125$  В – полуволновое напряжение ячейки Поккельса. Частота калибровочного сигнала выбиралась выше характерного времени отклика фотоприемника. Фазовая модуляция опорного луча ячейкой Поккельса, точно также как и фазовая модуляция сигнального луча акустическими колебаниями, регистрировалась в виде сигнала нестационарной фотоЭДС. Изменяя амплитуду калибровочного напряжения на ячейке Поккельса была снята калибровочная кривая,

связывающая сигнал нестационарной фотоЭДС и амплитуду фазовой модуляции, которая аппроксимировалась степенной функцией

$$\Delta\varphi = K_R \cdot V_{Ph}^{0,56}. \quad (2)$$

Множитель  $K_R$  в выражении (2) 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 (2) является эмпирической калибровочной формулой, связывающей значение амплитуды сигнала нестационарной фотоЭДС в микровольтах  $V_{Ph}$  и сдвиг фаз. Соответствующая определенному по формуле (2) фазовому сдвигу амплитуда колебаний поверхности вычислялась по формуле

$$\Delta X = \frac{K_R \cdot V_{Ph}^{0,56} \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}, \quad (3)$$

где  $\lambda = 532 \cdot 10^{-9}$  м – длина волны источника оптического излучения.

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

Проведем более детальное сопоставление результатов электрических и оптических измерений для ИЭОМ во второй конфигурации (МИОС). В диапазоне частот измерений от 0 до 2 МГц на зависимостях (Рис. 4) наблюдаются шесть резонансных пиков: 546, 735, 960, 1349, 1456 и 1744 кГц. На рисунке 6 представлены результаты сопоставления резонанса импеданса электродов и резонанса амплитуды акустических колебаний в межэлектродном зазоре на частоте модулирующего сигнала 960 кГц.

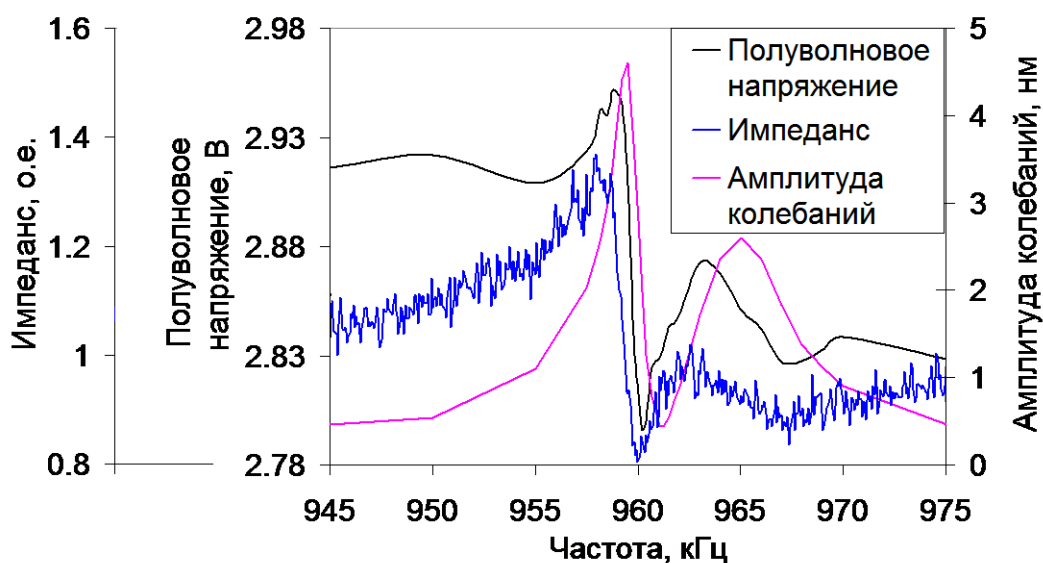


Рисунок 6 – Резонансный пик возбуждения акустических колебаний в подложке НЛ МИОС на собственной частоте 960 кГц

Для определения характера возбуждаемых колебаний подложки было получено пространственное распределение амплитуды колебаний поверхности при сканировании сигнальным лучом вдоль направления перпендикулярного боковым граням образца. Результаты измерений представлены на рисунке 7. На этом же рисунке представлены результаты компьютерного моделирования, проведенного в программном пакете COMSOL Multiphysics. Расчетное значение амплитуд колебаний значительно превосходит экспериментально наблюдаемые величины, это, скорее всего, связано с тем, что теоретическая модель не учитывает наличие золотых электродов на поверхности НЛ, которые могут существенно ослаблять амплитуду колебаний.

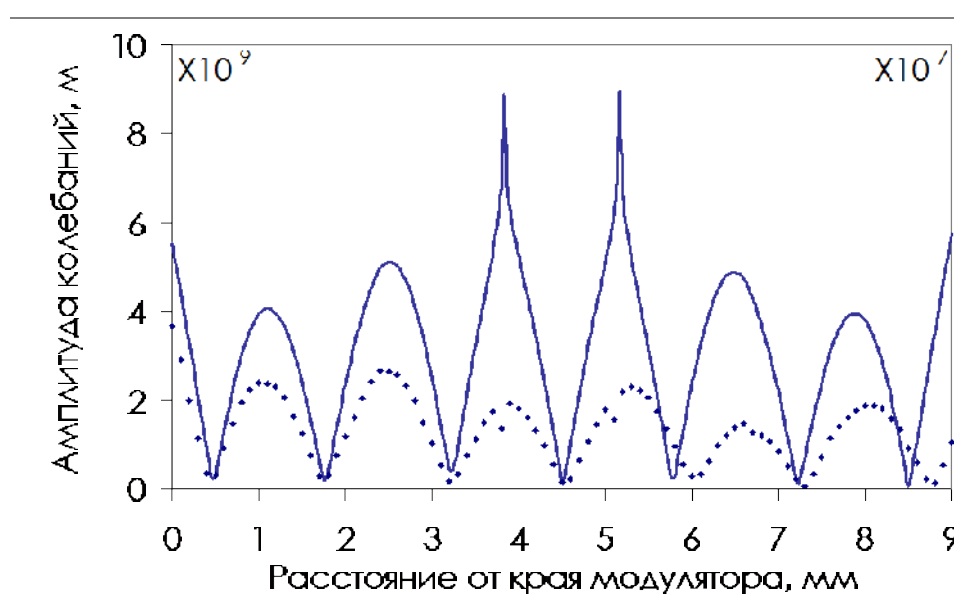


Рисунок 7 – Пространственное распределение амплитуд колебаний подложки МИОС на резонансной частоте 960 кГц – экспериментальные данные (точки, левая шкала), результаты компьютерного моделирования (сплошная линия, правая шкала)

Из формы пространственного распределения видно, что резонансные пики соответствуют 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,  $\lambda$  – длина акустической волны). В то же время, на высокой частоте ( $h/\lambda > 0,5$ ) дисперсия акустических волн значительно меньше. Так, например, полученные фазовые скорости акустических волн были 1296 м/с ( $h/\lambda = 0,185$ ), 2670 м/с ( $h/\lambda = 0,35$ ), 2737 м/с ( $h/\lambda = 0,37$ ), 2965 м/с ( $h/\lambda = 0,455$ ), 3240 м/с ( $h/\lambda = 0,6$ ) и 3290 м/с ( $h/\lambda = 0,8$ ). Из представленных данных можно сделать вывод, что фазовые скорости исследуемых акустических волн прямо пропорциональны квадратному корню из частоты при  $h/\lambda < 0,5$  и слабо зависят от частоты при  $h/\lambda > 0,5$ . Сопоставляя

результаты эксперимента с характеристиками известных типов акустических волн, можно сделать вывод, что исследуемые волны являются волнами Лэмба (объёмными волнами) при  $h/\lambda < 0,5$ , а при  $h/\lambda > 0,5$  – поверхностными волнами.

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. Анализ пространственного распределения амплитуд колебаний позволил выбрать форму подложки МИОС для подавления возбуждения стоячих волн Лэмба. Боковые грани были скошены под углом 3 градуса в направлении наклона межэлектродных зазоров (Рис. 8). В данной конфигурации в широком диапазоне частот условия кратности ширины подложки целому числу 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, где предъявляются особенно жесткие требования к шумам, а демпфирование акустических колебаний за счет жесткого крепления чипа модулятора не всегда возможно из-за требований широкого температурного диапазона работы.

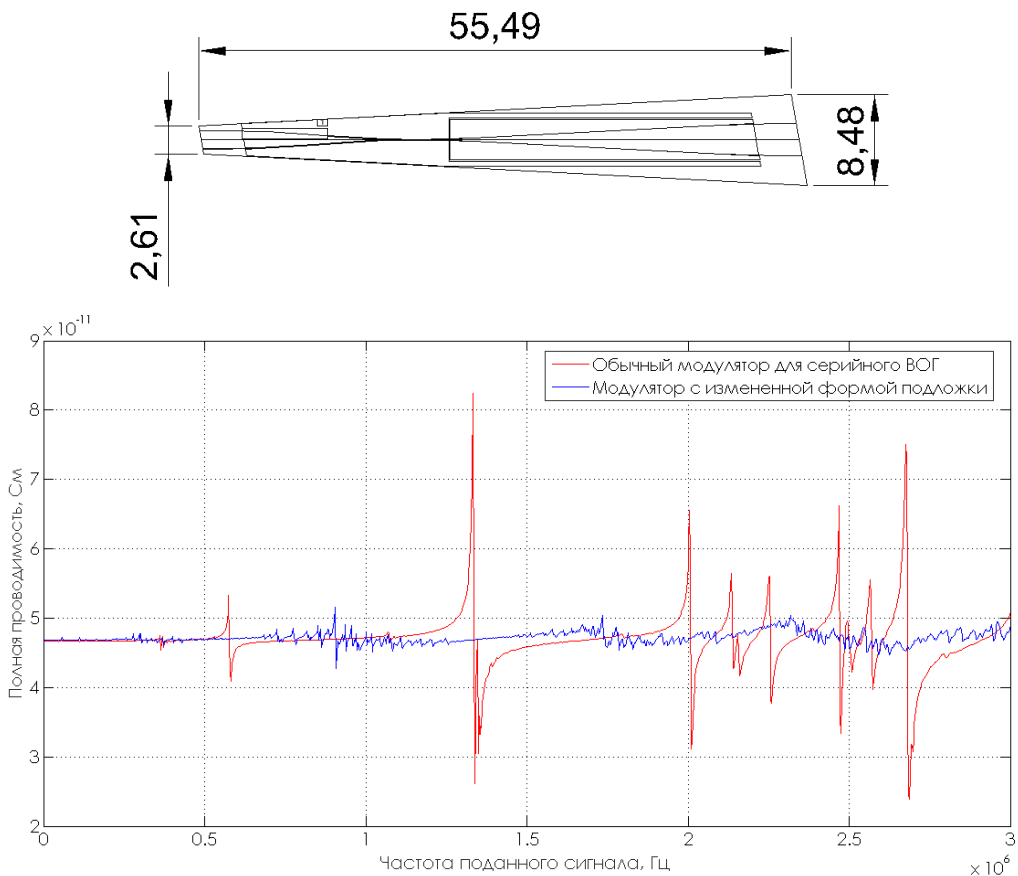


Рисунок 8 – Подавление акустических резонансов при использовании скошенной конфигурации чипа МИОС.

**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. Оптимизации ВШП по второму критерию посвящено достаточно много работ, прежде всего связанных с областью радиочастотных фильтров, в то время как вопрос возникновения шумов в ИАОМ изучен мало.

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. Именно данная конфигурация ИАОМ была выбрана для исследований. Схема ИАОМ показана на рисунке 9.

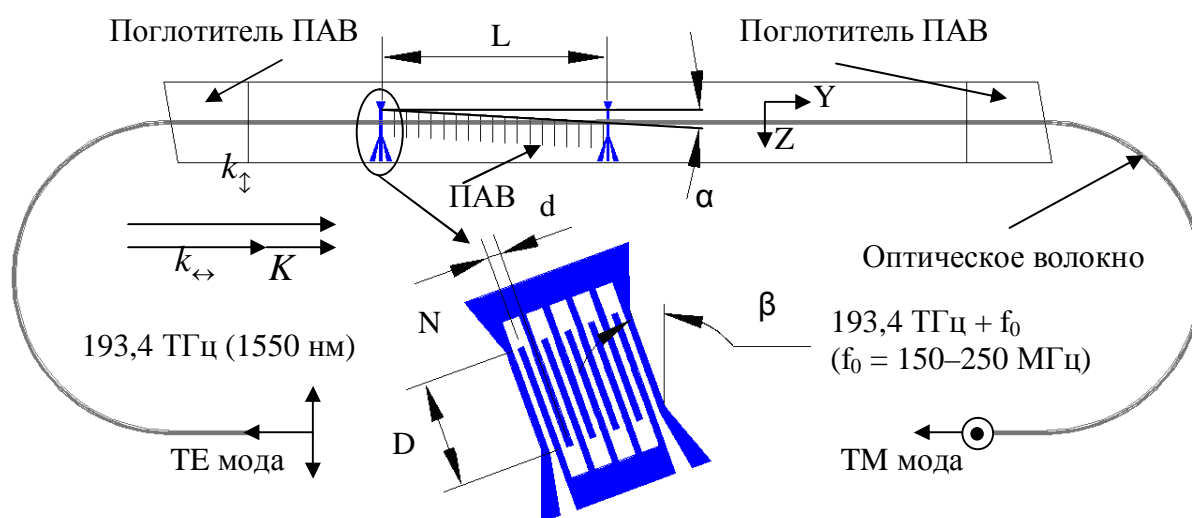


Рисунок 9 – Схема ИАОМ и ВШП ( $D$  – длина перекрытия электродов (4 мм, 1,7 мм или 1 мм),  $d$  – расстояние между средними линиями соседних электродов (10 мкм),  $N$  – число штырей (7, 11 или 17),  $\beta$  – угол между нормалью к электродам и осью  $Y$  ( $0-5^\circ$ ),  $\alpha$  – угол между векторами групповой и фазовой скоростей ПАВ,  $L$  – расстояние между ВШП (5 мм, 11 мм, 17 мм или 22 мм))

На поверхности монокристаллической пластины НЛ  $X$ -среза методом термической диффузии титана вдоль кристаллографической оси  $Y$  был сформирован каналый оптический волновод, являющийся одномодовым в телекоммуникационном диапазоне длин  $1520 \div 1580 \text{ нм}$ . 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  $\beta$ . 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, и 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. Было изготовлено несколько образцов ВШП с разным углом между нормалью к электродам и осью  $Y - \beta = 0; 3; 4$  или  $5$  градусов, с разным количеством штырей  $N = 7; 11$  и  $17$  и разной длиной перекрытия  $D = 4; 1,7; \text{ и } 1$  мм. 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.

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 10.

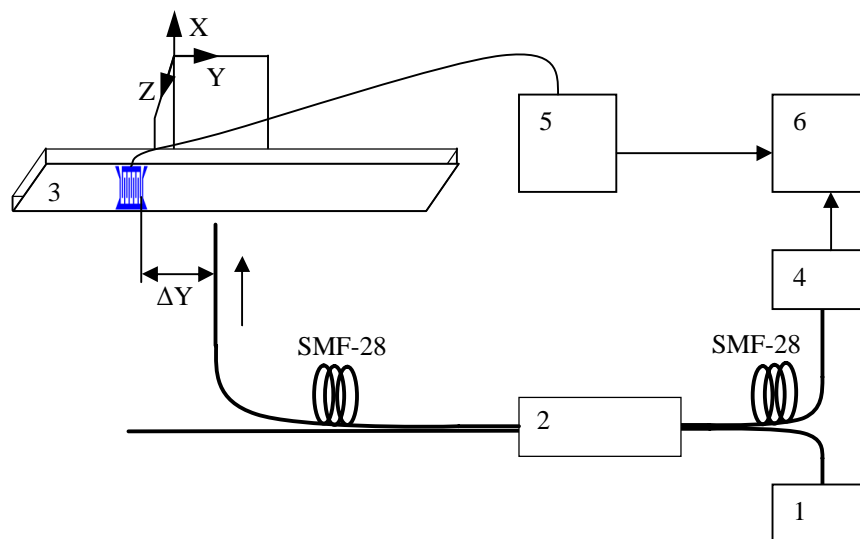


Рисунок 10 – Волоконный интерферометр для измерения амплитуды ПАВ (1 – лазерный диод (1550 нм, 100 мВт), 2 – оптоволоконный направленный X-ответвитель, 3 – образец, установленный на моторизованный позиционер, 4 – ВЧ фотодетектор (до 200 МГц), 5 – ВЧ генератор, 6 – селективный усилитель (Lock In),  $\Delta Y$  – расстояние между линией сканирования зонда и краем ВПП

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. Подстройкой расстояния между торцом волокна и поверхностью подложки НЛ выравнивались интенсивности интерферирующих отраженных волн, что повышало контраст интерференционного сигнала. Сигнал с фотодетектора измерялся с помощью селективного усилителя, синхронизированного по частоте с генератором. Чтобы исключить влияние изменения коэффициента отражения НЛ, при сканировании использовалась дополнительная модуляция сигнала на низкой частоте (около 230 Гц). Низкочастотный сигнал подавался на пьезопозиционер с закреплённым оптическим зондом. Возникающий низкочастотный сигнал на фотоприёмнике также селективно измерялся. Посредством нормирования амплитуды высокочастотного сигнала



амплитудой низкочастотного вычислялось значение, пропорциональное амплитуде ПАВ.

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:

$$\operatorname{Re}(Y(f)) = \hat{G}_a \left( \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \pi \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)}{\frac{N}{2} \sin\left(\pi \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)} \right)^2, \quad (4)$$

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:

$$\hat{G}_a = \frac{\pi^2 C_T f_0}{k^2 N}, \quad (5)$$

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 11.

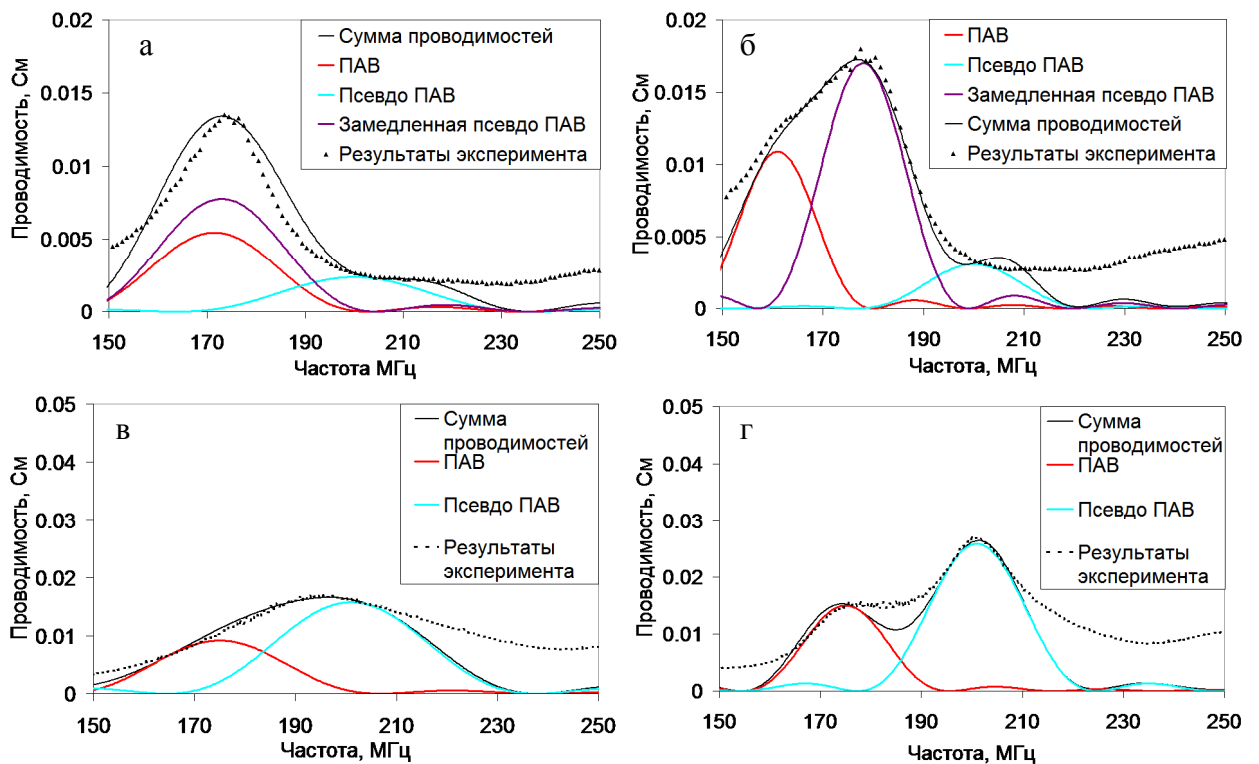


Рисунок 11 – Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) частотные характеристики действительной части проводимости ВШП: (а) золото, 11 штырей; (б) золото, 17 штырей; (в) алюминий, 11 штырей; (г) алюминий, 17 штырей

Из рисунка 11 видно, что экспериментальные зависимости невозможно объяснить возбуждением только одного вида акустических волн. Выражение (4) при рассмотрении возбуждения ПАВ только в виде волн Рэля 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 Рэля, 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 3,4% 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 11 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.

Для подтверждения вышеуказанных предположений были проведены дифракционные исследования. На картине дифракции (рисунок 12) наблюдалось два дифракционных порядка соответствующих ПАВ (первый и минус первый).

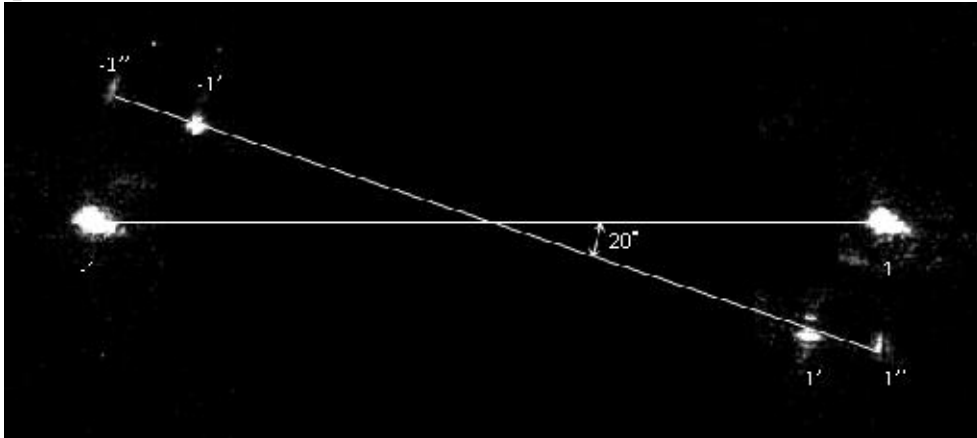


Рисунок 12 – Картина дифракции на акустических волнах для образца с золотым ВШП (17 штырей): 1 и -1 – первый и минус первый порядки дифракции на ПАВ; 1' и -1' – первый и минус первый порядки дифракции на быстрой псевдо ПАВ; 1'' и -1'' – первый и минус первый порядки дифракции на ПАВ

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 ( $Y_{slowPSAW}$ )

$$\text{Re}(Y(f)) = \text{Re}(Y_{SAW}(f)) + \text{Re}(Y_{PSAW}(f)) + \{\text{Re}(Y_{slowPSAW}(f))\}. \quad (6)$$

Вклад проводимости каждого типа акустических волн описывается выражением (4), в которое входит множитель (5) с резонансными частотами возбуждения, определенными из дифракционных экспериментов, табличными значениями коэффициентов электромеханической связи, а также электрической ёмкостью ВШП в качестве подгоночного коэффициента. Для алюминиевых ВШП  $f_{0SAW} = 175$  МГц,  $f_{0PSAW} = 200$  МГц,  $C_{T11} = 2,8$  пФ,  $C_{T17} = 7,1$  пФ. Для золотых ВШП частоты возбуждения каждого из типов волн были различны от образца к образцу:  $f_{0SAW}$  находилась в диапазоне от 160 до 175 МГц,  $f_{0PSAW} = 200$  МГц,  $f_{0slowPSAW}$  – от 173 до 180 МГц;  $C_{T11} = 1,7$  пФ,  $C_{T17} = 5,6$  пФ. 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 – 4000 м/с; для золотых ВШП скорость ПАВ – от 3200 м/с до 3400 м/с, а замедленной псевдо ПАВ – от 3450 м/с до 3550 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 шумов 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 ( $S_{21}$ ) 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  $S_{21}$  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  $S_{21}$  составило около 0,5 дБ. В то же время, влияние золотой полоски было существенным – уменьшение значения  $S_{21}$  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 ( $S_{21}$ ). Так, при расстоянии 5 мм уровень  $S_{21}$  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  $S_{21}$  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 12 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 (конфигурация установки представлена на рисунке 10). Результаты измерений представлены на рисунке 13. 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].

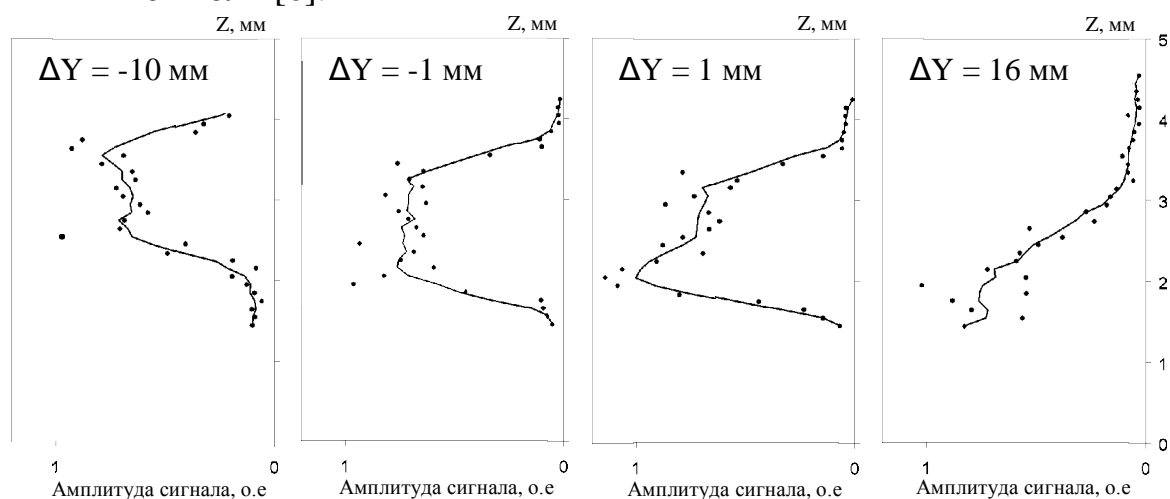


Рисунок 13 – Пространственное распределение амплитуды колебаний на различных расстояниях от ВШП

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  $\beta$  (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  $\beta$  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 не провзаимодействовавшего с ПАВ оптического излучения. Для рассматриваемой в работе конфигурации модулятора акустооптическое преобразование происходит с поворотом поляризации света, поэтому эффективность модуляции легко может быть измерена поляризационными методами. 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 провзаимодействовавшее 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 14(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  $\beta = 5^\circ$ .

Ширина резонансного пика акустооптического преобразования составила 80 кГц. Она определяется длиной взаимодействия ПАВ с оптическим излучением ( $\sim 45$  мм на основании результатов измерения пространственного распределения амплитуды ПАВ). 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.

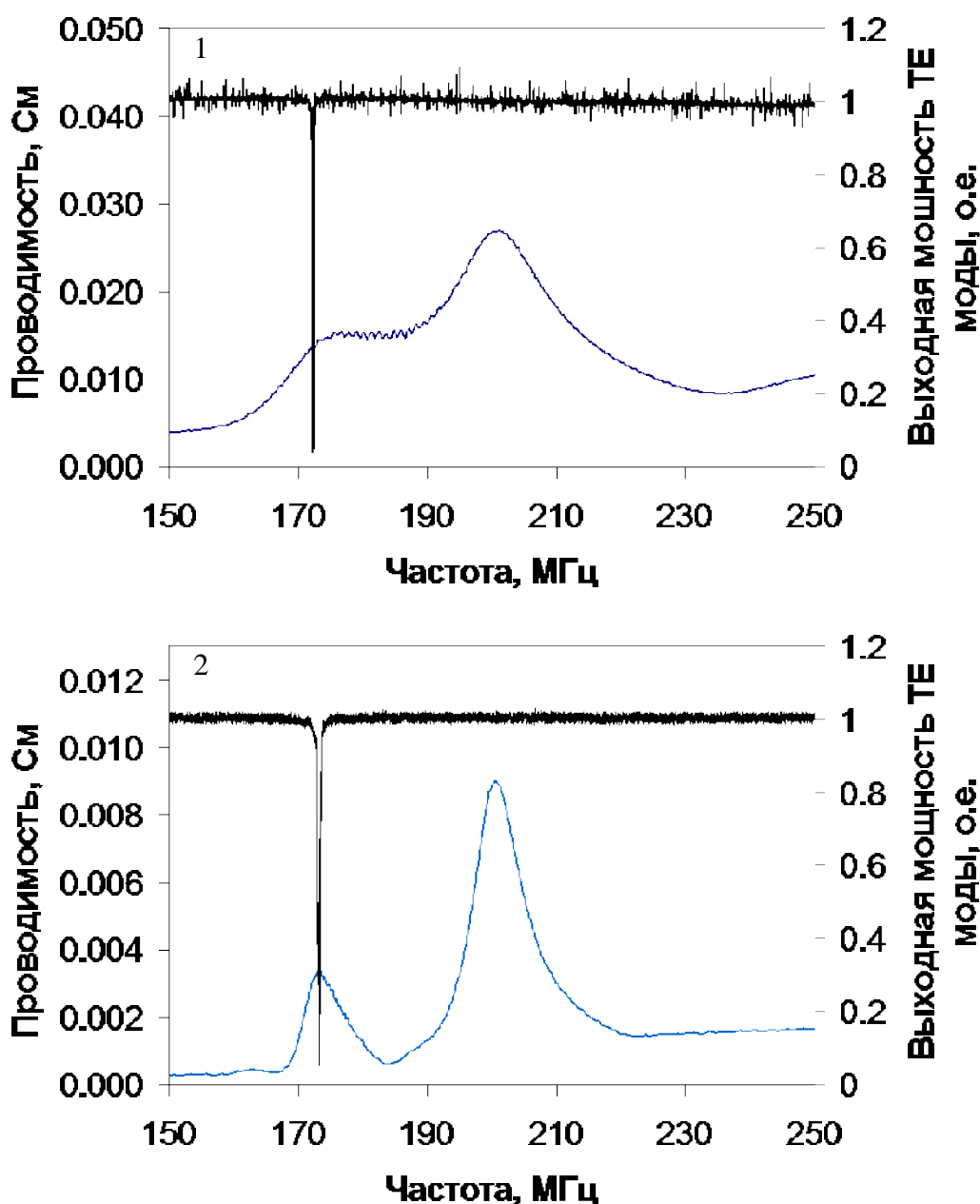


Рисунок 14 – (а) Частотная зависимость акустооптического преобразования. Для сопоставления приведена частотная зависимость действительной части комплексной проводимости ВШП: (1) – без акустического волновода, (2) – с акустическим волноводом. (б) Амплитудная зависимость эффективности акустооптического преобразования на резонансной частоте: (1) – без акустического волновода, (2) – с акустическим волноводом.

На резонансной частоте акустооптического преобразования 173 МГц были проведены измерения зависимости эффективности акустооптического преобразования от мощности модулирующего сигнала. На приведённой на рисунке 14(б) зависимости эффективности акустооптического преобразования от мощности модулирующего сигнала максимальная эффективность 95% соответствует мощности 125 мВт. Отметим, что при значительной мощности модулирующего сигнала (>23 дБм) начинали

проявляться эффекты, связанные с рассеянием тепла, выделяемого на омическом сопротивлении ВШП. Происходил дрейф резонансной частоты и уширение резонансного пика акустооптического преобразования.

Для понижения мощности модулирующего сигнала, соответствующей максимальной эффективности акустооптического преобразования, было предложено использовать акустический волновод (рисунок 15). 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.

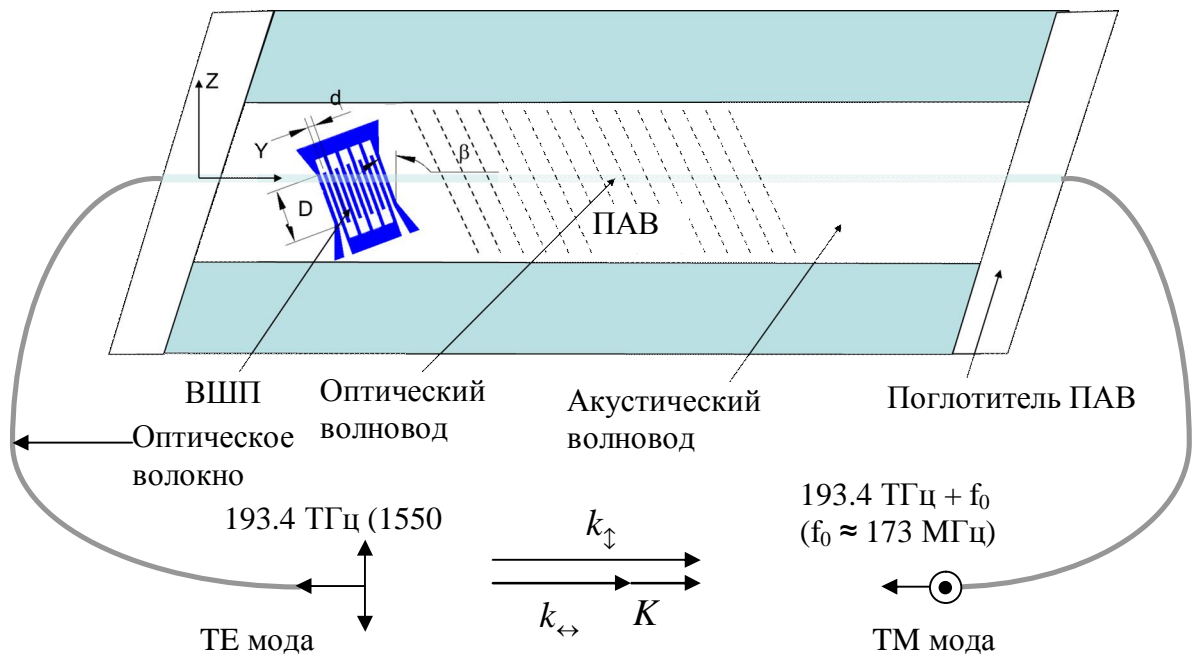


Рисунок 15 – Конфигурация образца акустооптического модулятора с акустическим волноводом ( $D$  – длина перекрытия электродов,  $d = 10,375$  мкм – расстояние между средними линиями двух соседних штырей,  $\beta = 5^\circ$  – компенсационный угол между электродами и осью  $Z$ )

Акустический волновод формировался методом термической диффузии титана в том же технологическом процессе, что и оптический волновод. В отличие от оптических волноводов, скорость акустических волн уменьшается в области диффузии титана, поэтому легированные области подложки играли роль боковых стенок канального акустического волновода (Рис. 15). Скорость волноводной моды ПАВ ( $V = 3590$  м/с) немного отличается от скорости свободного распространения ПАВ на подложке НЛ X-среза ( $V = 3500$  м/с), поэтому максимум реальной части проводимости ВШП



смещается и становится 179,5 МГц. Это приводит к существенному снижению эффективности акустооптического взаимодействия на резонансной частоте 173 МГц, в связи с чем расстояние между штырями ВШП было скорректировано ( $d = 10,375$  мкм) для смещения максимума реальной части проводимости ВШП обратно (Рис. 14(б)).

В экспериментах ширина акустического волновода равнялась длине перекрытия электродов и была выбрана равной 100 мкм. Как показали экспериментальные исследования, в конфигурации полосового акустоэлектрического фильтра в акустическом волноводе возбуждаются и распространяются сразу несколько волноводных мод, что проявляется в межмодовой интерференции, наблюдаемой на передаточной характеристике фильтра, а позднее, и на резонансных пиках акустооптического преобразования. Выполнение условий одномодового распространения может быть обеспечено за счет корректировки ширины акустического волновода и технологических условий его изготовления. Поскольку технологические условия термической диффузии титана были оптимизированы с точки зрения изготовления оптического волновода и минимальных потерь в оптическом тракте модулятора, то модовые характеристики акустического волновода корректировались его шириной. Теоретические оценки показали, что отсечка высших мод акустического волновода наблюдается при ширине волноводящего канала  $< 44$  мкм.

Использование конфигурации модулятора с акустическим волноводом позволило снизить мощность радиочастотного модулирующего сигнала, при которой наблюдается максимальное акустооптическое преобразование, до уровня 32 мВт при длине взаимодействия 45 мм. С практической точки зрения целесообразно уменьшить длину взаимодействия за счет некоторого повышения уровня мощности модулирующего сигнала. Эксперименты показали, что при длине акустооптического взаимодействия 13 мм необходимая для максимального акустооптического преобразования мощность модулирующего сигнала составляла 71 мВт. При данном уровне мощности еще не проявляется тепловой дрейф пика акустооптического преобразования, а селективность по частоте существенно снижается. Это делает модулятор менее восприимчивым к изменению длины волны света, дрейфу частоты генератора модулирующего сигнала и изменению внешней температуры.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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 чипе ИЭОМ с использованием специальной формы чипа и/или специальной конфигурации электродов.

Впервые проведены детальные исследования влияния материала и геометрии ВШП на возбуждение различных акустических волн на подложках НЛ 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.

### **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы**

1. Варламов А. В. и др. Резонансные акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах на основе ниобата лития //Фотон-экспресс. – 2017. – Т. 6. – №. 6. – С. 163-164.
2. Варламов А. В. и др. Исследование паразитных акустических резонансов интегрально-оптических модуляторов методами голографической интерферометрии //Голография. Наука и практика. – 2017. – С. 255-258.
3. Varlamov A. V. et al. Acoustic vibrations in integrated electro-optic modulators on substrates of lithium niobate //Technical Physics Letters. – 2017. – v. 43(11). – pp. 994-997.
4. Varlamov A. V. et al. The Influence of the Configuration and Material of Interdigital Transducers on the Excitation of Surface and Pseudosurface Acoustic Waves in Lithium Niobate Substrates //Technical Physics Letters. – 2019. – v. 45(7). – pp. 727-730.
5. Varlamov A. V. et al. Search for Optimal Conditions of SAW Excitation by Lithium Niobate Integrated Optical TE-TM Mode Convertor //2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2018. – pp. 172-175.
6. Varlamov A. V. et al. Optimal configuration of the waveguide acousto-optic TE-TM polarization mode convertor on X-cut lithium niobate substrate //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – v. 1236(1). – P. 012034.

### **Список 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. Cai L., Mahmoud A., Piazza G. Low-loss waveguides on Y-cut thin film lithium niobate: towards acousto-optic applications //Optics express. – 2019. – v. 27(7). – pp. 9794-9802.
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.