

На правах рукописи



Лебедев Владимир Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Шамрай Александр Валерьевич.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Дудкин Валентин Иванович, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, профессор кафедры фотоники и линий связи

Доктор физико-математических наук, профессор Шандаров Владимир Михайлович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники

Ведущая организация: Открытое акционерное общество "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор"

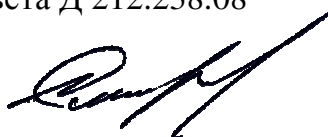
Защита состоится 6 декабря 2016 года в 17.00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан 5 октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.08
кандидат технических наук, доцент



Е.А Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Повышение эффективности высокочастотной и сверхвысокочастотной модуляции света является одной из ключевых задач в современных оптических информационных системах, которая напрямую связана с неуклонным ростом требований к пропускной способности и повышением полосы частот передаваемых сигналов. Преимущества интегрально-оптических модуляторов на основе эффекта Поккельса очевидны. Безынерционный электрооптический механизм модуляции хорошо подходит для работы на высоких частотах. Оптическое излучение в них распространяется в оптических волноводах малых поперечных размеров, что даёт возможность создавать достаточные для управления светом электрические поля приложением относительно малых электрических напряжений [1].

Основным используемым электрооптическим материалом для создания интегрально-оптических модуляторов является ниобат лития (LiNbO_3). Этот материал одним из первых нашёл практическое применение в модуляторах. Несмотря на это, среди публикаций посвящённых высокоскоростной модуляции света доля работ, где используются модуляторы на основе ниобата лития, последние десятилетия продолжала лишь увеличиваться [2]. Ведётся поиск новых подходов с целью увеличить рабочую полосу модуляторов, уменьшить необходимое управляющее напряжение. Публикуются работы, посвящённые улучшению характеристик аналоговых и цифровых фотонных линий связи, имеющих в своём составе интегрально-оптические модуляторы на основе ниобата лития, исследуются новые форматы модуляции. Интерес к интегрально-оптическим модуляторам на основе ниобата лития не уменьшился, не смотря на активные исследования новых типов модуляторов на основе полупроводников и полимеров [3]. Это объясняется уникальным сочетанием характеристик материала, обладающего помимо электрооптического эффекта высокой стойкостью к внешним условиям, низкими оптическими и СВЧ потерями, отработанными технологиями изготовления оптических волноводов и различных элементов интегрально-оптических схем.

Интерес к разработкам новых типов СВЧ модуляторов подкрепляется появлением новых научных направлений и новых практических применений волоконно-оптических систем. На сегодняшний день задача улучшения характеристик таких систем и улучшения компонентов таких систем является крайне актуальной, о чем свидетельствует значительное количество публикуемых научных работ [4].

Опубликовано большое количество работ, посвящённых расчёту характеристик модуляторов, в которых за основу берутся абстрактные конфигурации модуляторов и расчёт ведётся без учёта технологических ограничений, накладываемых процессом изготовления модуляторов. Однако, повышение требований к параметрам модуляции оптического излучения делает актуальным проблему определения оптимальной

конфигурации модулятора с учётом различных ограничений, накладываемых технологией его изготовления.

Повышение требований к параметрам модуляции делает актуальным вопрос улучшения характеристик модулированного излучения не только за счёт улучшения характеристик модуляторов (уменьшения эффекта дрейфа рабочей точки, уменьшения полуволнового напряжения и. т. п.), а также за счёт нахождения более эффективных способов интеграции модуляторов в системы, использующие модуляцию оптического излучения, путем выбора оптимальной рабочей точки и использования новых форматов модуляции.

Актуальность разработки и исследования новых методов высокочастотной и сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения определила выбор цели диссертационной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка и исследование новых методов повышения эффективности высокочастотной модуляции оптических сигналов, разработка устройств высокочастотной модуляции на основе волноводных структур на подложках ниобата лития и демонстрация их работоспособности в практических применениях.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Построение теоретической модели для выявления взаимосвязи характеристик модуляторов на подложках ниобата лития с параметрами технологических операций и материалами, используемыми для их изготовления.

- Исследование возможности повышения эффективности модуляции и увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий связи при использовании новых форматов модуляции и новых интегрально-оптических модуляторов.

- Исследование возможности повышения характеристик высокочастотной модуляции оптических сигналов и волоконно-оптических систем при особых условиях включения интегрально-оптических модуляторов, разработка новых методов управления рабочей точкой.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

В данной работе впервые:

- Проведен анализ влияния материала электродов на характеристики модуляторов. Произведены теоретический расчёт и экспериментальное исследование характеристик модулятора бегущей волны с электродами на основе гальванического серебра. Показано, что более высокая по сравнению с золотом удельная проводимость материала электродов позволяет расширить полосу частот модуляции и снижает требования по согласованию групповых скоростей оптической волны и модулирующей СВЧ волны.

- Исследовано влияние формы электродов на характеристики модулятора и

показано, что наклон стенок электродов, позволяет уменьшить толщину электродов и полуволновое напряжение, однако ограничивает полосу частот модулятора.

- Продемонстрировано увеличение коэффициента передачи аналогового СВЧ сигнала по волоконно-оптической линии связи с внешним модулятором на основе LiNbO_3 и оптическим усилителем работающем в режиме близком к насыщению путем оптимизации положения рабочей точки модулятора. Проанализированы нелинейные искажения данной системы.

- Предложен оригинальный метод стабилизации рабочей точки электрооптического модулятора Маха-Цендера в минимуме прохождения, использующий для обратной связи нелинейный детектор с усреднением. Разработана система для генерации когерентных оптических импульсов с высоким коэффициентом экстинкции (более 40 дБ).

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Практическая ценность работы заключается в том, что её результаты могут быть использованы при разработке и создании широкого круга интегрально-оптических устройств для управления оптическим излучением, а также для улучшения характеристик систем имеющих в своём составе электрооптические модуляторы бегущей волны на основе LiNbO_3 .

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- Повышение проводимости материала электродов позволяет расширить рабочую полосу СВЧ интегрально-оптических модуляторов бегущей волны на основе ниобата лития, а также снизить требования по согласованию скоростей оптического и модулирующего сигналов.

- Увеличение наклона боковых стенок электродов позволяет снизить толщину электродов и диэлектрического буферного слоя, соответствующих точному выполнению условия согласования скоростей, что при неизменной длине активной зоны модулятора приводит к снижению полуволнового напряжения на низких частотах, однако уменьшает полосу частот за счет увеличения высокочастотных потерь в электродах.

- В радиофотонных трактах, содержащих оптический усилитель и СВЧ модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера, максимальный коэффициент передачи ВЧ сигнала наблюдается при смещении рабочей точки модулятора из квадратуры в сторону меньшего пропускания оптической мощности.

- Стабилизация рабочей точки СВЧ электрооптического модулятора Маха-Цендера в минимуме прохождения с использованием нелинейного детектирования позволяет реализовать генерацию когерентных оптических импульсов с высоким (>40 дБ) коэффициентом экстинкции.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались

на следующих конференциях, семинарах и школах: V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 1st International School and Conference Saint-Petersburg OPEN on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2nd International School and Conference Saint-Petersburg OPEN on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2014 International Conference Laser Optics, 17th International Conference «Laser Optics 2016»

СТРУКТУРА И ОБЪЁМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объём работы составляет 126 страниц, включая 46 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

В диссертации использованы только те результаты, в получении которых автору принадлежит определяющая роль. Опубликованные работы написаны в соавторстве с членами научной группы. В совместных работах диссертант принимал участие в моделировании, расчётах, в создании экспериментальных установок, проведении экспериментов и интерпретации результатов. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ содержит обоснование актуальности проведённых в диссертационной работе исследований. В нём определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены защищаемые положения.

ПЕРВАЯ ГЛАВА является обзорной. В подразделе 1.1. описаны типы модуляторов и их основные характеристики. В подразделе 1.2 описаны свойства и обоснован выбор кристалла LiNbO₃ в качестве материала подложки интегрально-оптических структур, описаны принципы и особенности работы модуляторов бегущей волны на основе LiNbO₃. В подразделе 1.3 рассмотрены наиболее перспективные области применения модуляторов на основе LiNbO₃. В заключение главы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена анализу конфигураций модулятора бегущей волны на основе ниобата лития. Основное внимание уделено анализу оптимальных геометрических конфигураций электродов таких модуляторов при наличии технологических ограничений.

В подразделе 2.1 описана методика расчёта и используемые приближения. Исследовалась модель модулятора бегущей волны с электродами в виде копланарного СВЧ волновода, выполненного на X-срезе кристалла ниобата лития при наличии буферного слоя (рис. 1). Характерные поперечные размеры копланарного волновода необходимые для эффективной концентрации поля в оптическом волноводе составляют порядка десятков микрометров, что намного меньше длины волны СВЧ излучения в ниобате лития на частотах порядка десятков гигагерц, вследствие этого для анализа волновода применена теория длинных линий.

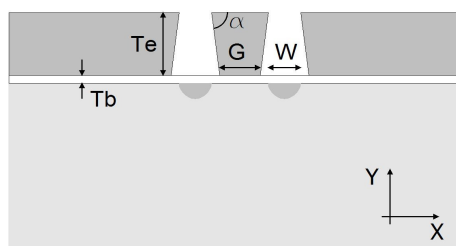


Рисунок 1. Геометрические параметры модели, используемой в расчётах и условные направления осей.

В процессе анализа путём численного решения двумерных задач методом конечных элементов, находились погонные параметры длинной линии на сверхвысоких частотах, исходя из которых вычислялись её характеристики. Вычислялась групповая скорость распространения оптического излучения в оптических волноводах с учётом дисперсии. Расчёт амплитудно-частотных оптикоэлектрических характеристик, определяемых взаимодействием модулирующей СВЧ и модулируемой оптической волн, проводился с использованием аналитического выражения, выведенного интегрированием фазовых смещений, вызываемых присутствием поля модулирующей волны в интегрально-оптическом волноводе по длине области их взаимодействия.

В теоретическом анализе использовался ряд упрощений, широко применяемых в работах, посвящённых оптимизации характеристик электрооптических модуляторов на основе ниобата лития: не учитывались акустоэлектрические эффекты, частотные зависимости электрических и электрооптических характеристик ниобата лития, не учитывались иные виды потерь кроме омических потерь в проводниках и потерь в диэлектриках подложки и буферного слоя.

Учитывая связанную с дисперсией в оптическом волноводе поправку к групповому показателю преломления, рассчитанный на основании уравнения Селмейера групповой показатель преломления оптической волны N_g принимался равным 2,19.

Для нахождения эффективного показателя преломления СВЧ и волнового сопротивления численно решалось уравнения Лапласа для двух электростатических задач. В первой задаче потенциал центрального проводников полагался равным 1 В, потенциал боковых проводников – 0 В. Диэлектрическая проницаемость буферного слоя полагалась равной $\epsilon_x = \epsilon_y = 3,9$, что соответствует плавленому кварцу. Для подложки из ниобата лития учитывалась анизотропия $\epsilon_x = 28$, $\epsilon_y = 43$, для воздуха $\epsilon_x = \epsilon_y = 1$. Через найденные компоненты поля интегрированием по соответствующим площадям находились следующие погонные суммарные энергии: энергии поля в воздухе W_{al} , в буферном слое W_{bl} , в подложке W_{sl} , полная энергия электрического поля $W_{tl} = W_{al} + W_{bl} + W_{sl}$.

При решении второй электростатической задачи рассматривалась такая же как и в первой задаче геометрия электродов, но диэлектрическая проницаемость всех диэлектриков полагалось $\epsilon_x = \epsilon_y = 1$. В результате вычислялись погонные величины

энергий $W_{a2}, W_{b2}, W_{s2}, W_{i2}$. Для определения потерь в волноводе $\alpha(f)$ решалась двумерная задача, в которой на частоте сигнала 4 ГГц (значение, выше которого выполняется приближение прямо пропорциональной зависимости погонного сопротивления от корня из частоты) вычислялось погонное сопротивление электродов $R_{4ГГц}$.

На основании рассчитанных значений $W_{a1}, W_{b1}, W_{s1}, W_{a2}, W_{b2}, W_{s2}, R_{4ГГц}$ вычислялись эффективный показатель преломления СВЧ волны N_m , волновое сопротивление СВЧ волновода Z и зависящий от частоты коэффициент потерь волны $\alpha(f)$ в СВЧ волноводе, а также рабочая полоса модулятора Δf .

В подразделе 2.2 проведён расчёт оптимальных геометрических параметров модулятора с электродами на основе серебра при наличии технологических ограничений: проанализировано влияние материала электродов, ограничения на толщину электродов и влияния наклона стенок на рабочую полосу модулятора.

Частотную характеристику электрооптического отклика модулятора в случае пренебрежения потерями в материалах диэлектриков можно представить в виде

$$H(f) = e^{-\alpha_1 \sqrt{f}} \sqrt{\frac{sh^2(\alpha_1 \sqrt{f}) + \sin^2(\xi_1 f)}{(\alpha_1 \sqrt{f})^2 + (\xi_1 f)^2}} \quad (1)$$

где α_1, ξ_1 - параметры отвечающие за потери и рассогласование скоростей соответственно.

График зависимости расчётной полосы пропускания (при пренебрежении прочими потерями кроме потерь в электродах) по уровню -3 дБ для типичных значений параметров ξ_1 и α_1 приведён на рисунке 2(а).

Электроды одинаковой геометрической конфигурации, изготовленные из серебра и золота будут иметь коэффициенты α_1 отличающиеся в $\alpha_{1Au} / \alpha_{1Ag} = \rho_{Au} / \rho_{Ag} = 1,18$ раза (где ρ_{Au}, ρ_{Ag} - удельное сопротивление золота и серебра соответственно [5]). Следует, однако, заметить, что проводимость плёнок материала, нанесённых различными методами, может отличаться от справочной объёмной проводимости материала [6,7]. График функции прироста рабочей полосы модулятора от параметра рассогласования $F_{add}(\xi_1) = \Delta f(\alpha_1 / 1,18, \xi_1) / \Delta f(\alpha_1, \xi_1)$ для типичных значений параметра потерь α_1 приведён на рис. 2(б). Из приведённых зависимостей следует, что повышение проводимости материала электродов позволяет расширить рабочую полосу, а также снизить требования согласования скоростей оптической и модулирующей СВЧ волн.

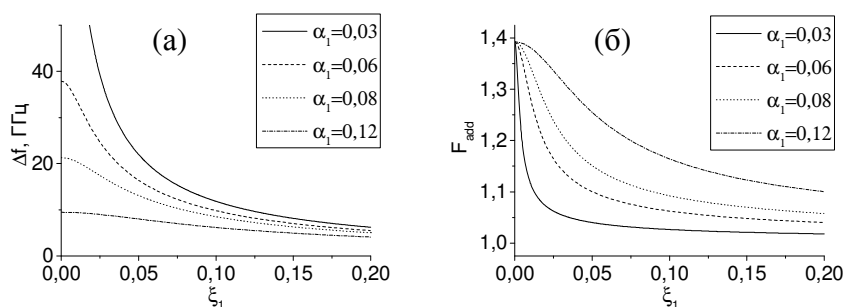


Рисунок 2. Графики зависимости расчётной рабочей полосы (а) и прироста рабочей полосы модулятора при использовании серебра (б) от параметра рассогласования скоростей при различных значениях параметра потерь

Проведен теоретический анализ влияния геометрических параметров на характеристики модуляторов с электродами на основе серебра. Расчёт проводился для толщин буферного слоя в диапазоне $T_b=0.2 - 2,5$ мкм, ширине центрального электрода $G=13$ мкм, толщин электродов $T_e=5, 10, 15, 20, 25$ мкм. Длина активной области принималась равной 27 мм. Расстояние между волноводами $W+G=27$ мкм.

Графики зависимости рабочей полосы модулятора и волнового сопротивления электродов от буферного слоя для различных толщин электродов представлены на рис. 2(а), 2(б).

Зависимость полосы частот от толщины буферного слоя имеет максимум, при этом максимальная полоса пропускания достигается при толщине буферного слоя, близкой к толщине буферного слоя соответствующей согласованию скоростей модулирующей и модулируемой волн, но не строго равной ей. Этот эффект объясняется наличием потерь в проводниках и диэлектриках и главным образом зависимостью коэффициента потерь в проводниках от волнового сопротивления и, соответственно, от толщины буферного слоя.

Графики зависимости оптимальной толщины буферного слоя, от толщины электродов, а также величина рабочей полосы модулятора при оптимальной толщине буферного слоя приведены на рис. 2(в), 2(г). Критериям выбора оптимальной толщины буферного слоя была выбрана максимальная рабочая полоса модулятора.

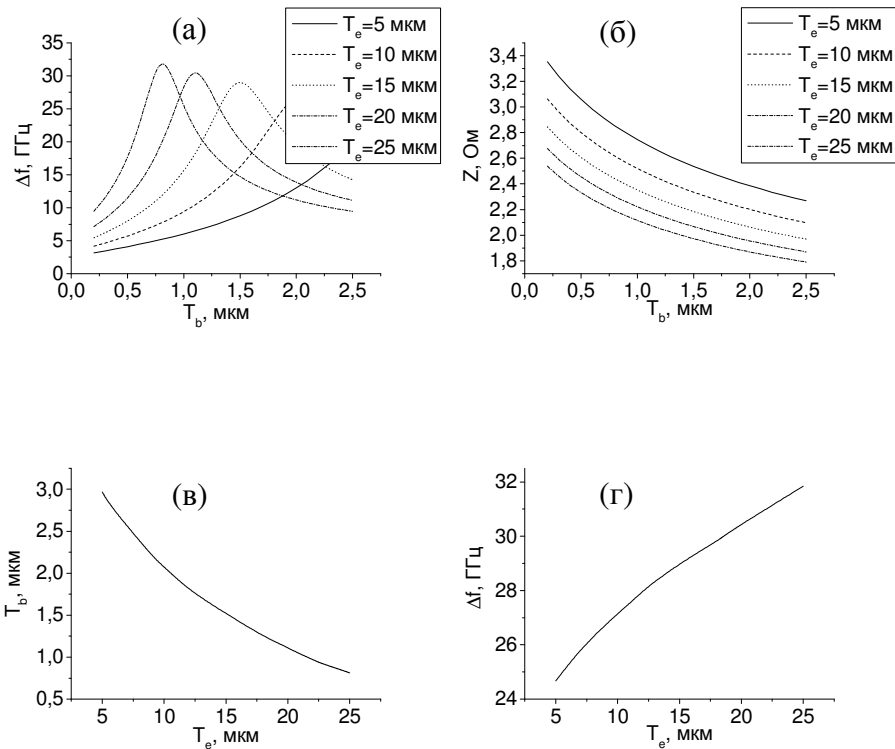


Рисунок 2. Графики зависимости рабочей полосы модулятора (а), волнового сопротивления электродов (б) от толщины буферного слоя для различных толщин электродов. Зависимость оптимальной с точки зрения рабочей полосы толщины буферного слоя (в) и достижимой величины рабочей полосы (г) от толщины электродов

В результате особенностей технологии формирования электродов может возникнуть ситуация, когда стенки копланарных электродов неперпендикулярны и имеют некоторый угол наклона α (рис. 1). Это приводит к увеличению доли энергии поля модулирующей волны в воздухе, что соответствует уменьшению эффективного показателя преломления волны. Расчётные зависимости оптимальной толщины буферного слоя и соответствующей ей рабочей полосы от наклона стенок электродов представлены на рис. 3(а,б).

Построенные на рис. 2(а, б) и рис. 3(а) зависимости демонстрируют, что толщина буферного слоя может быть эффективно использована в качестве параметра для коррекции ошибок и погрешностей на этапе осаждения толстых металлических слоев, представляющего наибольшие технологические трудности.

Зависимости коэффициента потерь в проводниках, а также волнового сопротивления при оптимальной толщине буферного слоя от величины наклона стенок электродов представлены на рис. 3(в-г). При увеличении наклона стенок электродов толщина буферного слоя, необходимая для согласования скоростей модулирующей и модулируемой волн, уменьшается, вследствие увеличения доли энергии электрического поля, сконцентрированной в воздухе. При этом максимально достижимая полоса падает из-за роста потерь в проводниках при увеличении наклона

стенок вследствие прохождении токов в областях острых углов электродов. Увеличение наклона стенок электродов также уменьшает волновое сопротивление, поскольку сокращение расстояния между электродами в их верхней части вызывает увеличение погонной ёмкости электродов.

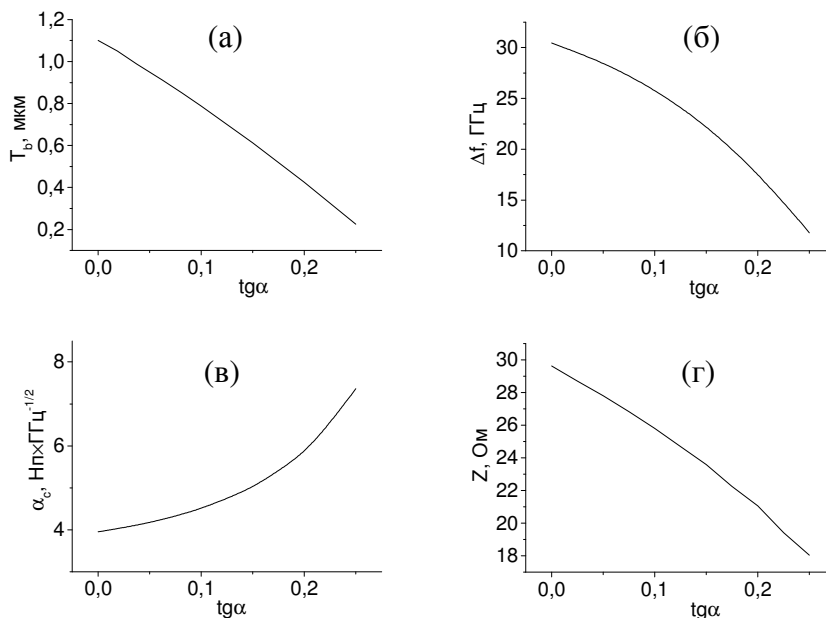


Рисунок 3. Зависимость оптимальной толщины буферного слоя (а), рабочей полосы при оптимальной толщине буферного слоя (б), коэффициента потерь в проводниках (в), волнового сопротивления (г) от наклона стенок электродов.

Проведённый анализ и рассчитанные на его основе графики, содержат информацию о влиянии геометрических параметров на характеристики модулятора и могут быть использованы при выборе оптимальной конфигурации модулятора, при различных критериях оптимизации.

В подразделе 2.3 проведено экспериментальное исследование модулятора с электродами на основе серебра. С учётом имевшихся технологических ограничений был изготовлен опытный образец интегрально оптического модулятора на подложке LiNbO_3 X-среза со следующими геометрическими параметрами структуры: $G=13$ мкм, $W=14$ мкм, $T_e=5$ мкм, $T_b=1,2$ мкм длина области взаимодействия модулирующей и модулируемой волн была равна 27 мм, а полная длина СВЧ волновода была равна 32 мм.

На изготовленном образце с использованием векторного анализатора цепей были проведены измерения зависимости потерь и задержки СВЧ волны в копланарных электродах и электрооптического ответа модулятора от частоты. При измерении группового показателя преломления применялось короткое замыкание СВЧ электродов на концах копланарной линии. Определенный из экспериментальных данных эффективный показатель преломления копланарной линии был равен $N_m =$

2,81, что согласуется с рассчитанным на основании геометрических и материальных параметров структуры значением теоретической оценки 2,65.

На рис 4(а) представлены графики экспериментальной зависимости измеренного параметра S_{21} СВЧ волновода от частоты, а также теоретическая кривая, вычисленная с учётом влияния скин-эффекта. Теоретически рассчитанная на основании измеренных характеристик СВЧ волновода и экспериментально измеренная частотная зависимость электрооптического ответа модулятора представлены на рис 4(б).

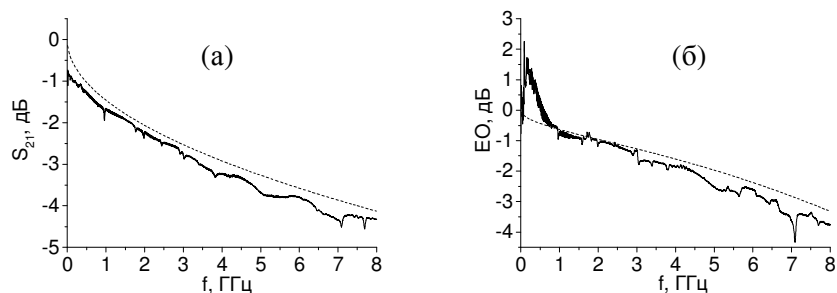


Рисунок 4. Теоретическая и экспериментальная частотные зависимости параметра S_{21} (а) электрооптического ответа модулятора (б).

В диапазоне частот от 2 до 8 ГГц теоретически рассчитанные зависимости находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния положения рабочей точки электрооптического модулятора на характеристики оптической линии передачи сигналов, содержащей в своём составе электрооптический модулятор бегущей волны на основе LiNbO_3 и эрбиевый усилитель, работающий в режиме близком к насыщению

В подразделе 3.1 дано описание модели линии, представленной на рис. 5.

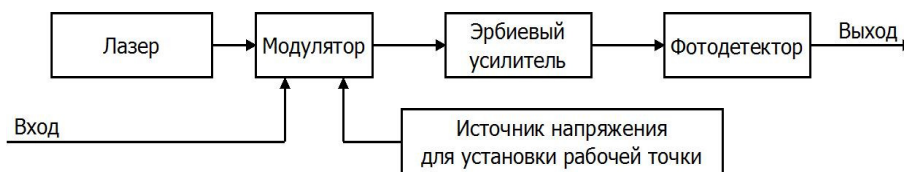


Рисунок 5. Модель радиофотонной линии передачи сигнала

Коэффициент усиления эрбиевого усилителя при этом может быть описан эмпирическим выражением [8]

$$G_{edfa} = \frac{G_0}{1 + \left(G_0 \frac{P_{MZ}}{2P_{sat.out}} \right)^\alpha} \quad (2)$$

где G_0 — коэффициент усиления малого сигнала, P_{MZ} — средняя оптическая мощность на входе усилителя, $P_{sat.out}$ — выходная мощность насыщения усилителя, α — параметр.

В случае, если фотодетектор нагружен на сопротивление r , Общий коэффициент передачи линии определяется выражением

$$G_{RF} = \frac{P_{RF,out}}{P_{RF,in}} = \frac{r_{mod} r \left(G_{edfa} P_{laser} R J_1 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2}{V_{rf}^2} \quad (3)$$

где $P_{RF,in}$ - входная мощность первой гармоники, $P_{RF,out}$ - мощность первой гармоники на выходе линии передачи, P_{laser} - выходная мощность лазера, V_{π} - полуволновое напряжение RF электродов модулятора, $V_{\pi bias}$ - полуволновое напряжение bias-электродов модулятора, V_{bias} - напряжение смещения рабочей точки модулятора, V_{rf} — амплитуда напряжения модулирующего сигнала на RF входе модулятора.

При смещении рабочей точки модулятора из квадратуры в сторону меньшего пропускания оптического излучения, увеличивается отношение оптической мощности, осциллирующей на частоте 1-й гармоники, к постоянной составляющей мощности. Кроме того, уменьшение оптической мощности на выходе модулятора вызывает рост коэффициента усиления эрбиевого усилителя в соответствии с (2). Общий вклад этих двух эффектов приводит к росту коэффициента передачи линии при сохранении уровня выходной оптической мощности, которая обычно ограничивается насыщением фотоприемника.

В качестве меры нелинейных искажений были использованы амплитуды 2-й и 3-й гармоники. Коэффициент нелинейных искажений по мощности был определён как

$$K_{nd} = \frac{P_2 + P_3}{P_1} = \left(\left(J_2 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \cos \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2 + \left(J_3 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2 \right) \left(J_1 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^{-2} \quad (4)$$

где P_1 , P_2 , P_3 – мощности первой, второй и третьей гармоники сигнала на выходе фотодетектора соответственно.

В подразделе 3.2 описаны экспериментальные результаты исследования коэффициента передачи и нелинейных искажений радиифотонной линии, представленной на рис. 5. В качестве источника лазерного излучения был выбран полупроводниковый лазер с центральной длиной волны 1551 нм в центре линии усиления эрбиевого волоконного усилителя. Использовался экспериментальный образец электрооптического модулятора бегущей волны на основе LiNbO_3 с полуволновым напряжением RF-входа 6 В и полуволновым напряжением bias-входа 13,8 В. Накачка эрбиевого волоконного усилителя осуществлялась на длине волны 980 нм с двух сторон эрбиевого волокна (попутно и встречно) через WDM-делители. В качестве фотоприёмника использовался широкополосный фотоприёмник с чувствительностью 0.7 А/Вт и полосой частот 16 ГГц. Для исключения повреждения фотоприёмника сигнал на него поступал через оптический аттенюатор с коэффициентом ослабления ~ 10 дБ. Полученный на выходе линии электрический

сигнал на радиочастоте регистрировался с помощью цифрового осциллографа, имеющего функцию вычисления быстрого преобразования Фурье.

Были построены теоретическая и экспериментальная зависимости относительной мощности первой гармоники, а также коэффициента нелинейных искажений от нормированного приведённого напряжения смещения $V=(V_0-V_{\min})/V_{\text{pbias}}$, где V_{\min} – напряжение на bias-входе модулятора, соответствующее минимуму пропускания оптической мощности. Результаты представлены на рис 6(а, б). При расчете теоретических кривых использовались следующие параметры усилителя, лазера и сигнала на RF-входе модулятора: $G_0 = 200$, $P_{\text{laser}} = 0,2$ мВт, $P_{\text{sat}} = 2,5$ мВт, $\alpha = 1$, $V_{\text{rf}} = 0,65$ В.

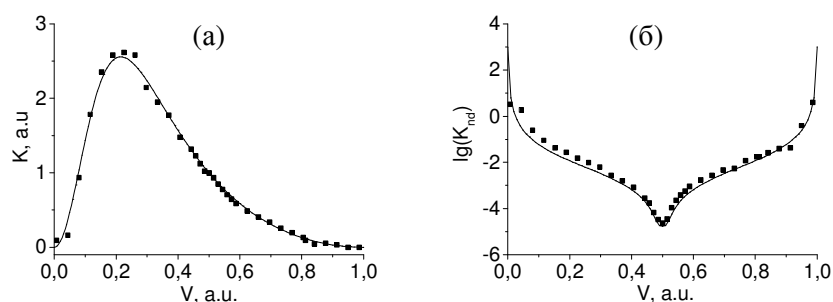


Рисунок 6. Графики зависимости относительной мощности первой гармоники ВЧ сигнала (а) и коэффициента нелинейных искажений (б) от нормированного приведённого напряжения смещения. Квадраты – экспериментальные точки, сплошная кривая – теоретический расчет.

Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теоретическими. На кривой имеется максимум, соответствующий максимальному коэффициенту передачи радиофотонного тракта в районе 0,25 нормированного приведённого напряжения смещения. В этой точке амплитуда первой гармоники на выходе радиофотонного тракта превышает амплитуду на выходе при работе в квадратуре в 2,5 раза. Экспериментально измеренная и расчётная зависимости коэффициента нелинейных искажений от нормированного приведённого напряжения смещения так же хорошо согласуются друг с другом. В точке 0,25 нормированного приведённого напряжения смещения, примерно соответствующей максимуму коэффициента передачи, теоретически рассчитанный коэффициент нелинейных искажений K_{nd} составляет порядка 0,5%.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена исследованию методов генерации оптических импульсов высокой экстинкции с использованием СВЧ модуляторов бегущей волны Маха-Цендера на основе LiNbO₃.

В подразделе 4.1 сформулированы проблемы и ограничения, связанные генерацией и измерением характеристик импульсов с высокой экстинкцией при использовании интегрально-оптических модуляторов Маха-Цендера на основе ниобата лития.

В подразделе 4.2 сформулированы требования к форме импульса напряжения на RF-входе модулятора бегущей волны и приведён метод создания корректной

формы импульса.

Для модулятора с полуволновым напряжением 5 В и импульса с экстинкцией 50 дБ максимальное напряжение ошибки составит 23 мВ.

Для получения минимальной ошибки напряжения на электродах модулятора за максимально короткое время после начала его переключения из открытого состояния в закрытое, может использоваться особый класс устройств - генераторы импульсов с плоским дном (Flat-Bottom Pulse Generator, FBPG) Исследовалась конструкция генератора импульса, подобная описанной в [9]. Генератор представляет из себя составное устройство, в котором к лабораторному генератору с 50-омным выходом, генерирующем последовательность двуполярных импульсов, последовательно в линию включается высокоскоростной полупроводниковый диод. Роль нагрузки при этом выполняет интегральнооптический модулятор бегущей волны. Вследствие сложности прямого измерения времени установления на выходе генератора импульса с плоским дном, исследование формы импульса на выходе производилось методом моделирования в SPICE-симуляторе.

С целью характеристики модулятора как линейной электрической нагрузки с использованием векторного анализатора были произведены измерения комплексного значения параметра S_{11} в диапазоне 10 МГц - 5 ГГц. На основе полученных данных модулятор был приближённо представлен эквивалентной схемой. Измеренная форма импульса лабораторного генератора при работе на нагрузку 50 Ом представлена на рис. 7(а). Полученные данные использовались при моделировании в SPICE-симуляторе. В результате серии моделирований в качестве диода, используемого в генераторе импульсов с плоским дном был выбран диод Шоттки HSMS-282.

Форма импульса на выходе генератора импульса с плоским дном, полученная при SPICE-моделировании, представлена на рис 7(б).

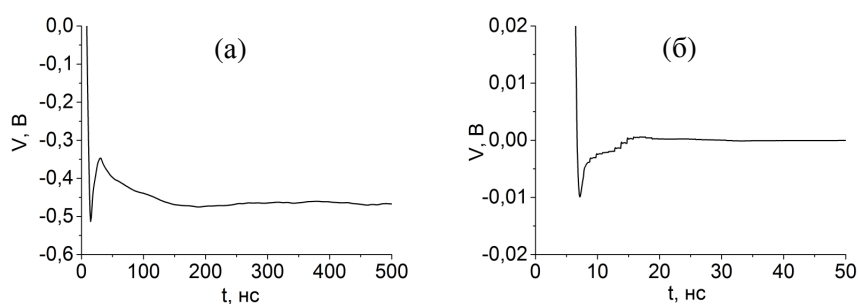


Рисунок 7. Форма импульса лабораторного генератора (а). Форма импульса на выходе генератора импульса с плоским дном (б).

В подразделе 4.3 описан метод верификации формы и экстинкции импульса на выходе модулятора с использованием детектора единичных фотонов.

Измерение экстинкции оптического импульса с использованием стандартных полупроводниковых оптоэлектронных детекторов, снабжённых усилителем с последующей регистрацией формы электрического импульса на выходе, осложнено наличием остаточных явлений во входных цепях регистрирующих устройств после

прохождения электрического импульса большой амплитуды.

Решением данной проблемы может являться переход к принципиально другому методу регистрации импульсных оптических сигналов. Был использован метод набора статистики времени регистрации единичных фотонов ослабленного оптического сигнала.

Сигнал с выхода модулятора ослаблялся аттенюатором и направлялся на детектор единичных фотонов. Импульсы с детектора фотонов записывались цифровым осциллографом вместе с импульсами синхронизации генератора, подающего сигнал на RF-вход модулятора. На рис. 8 представлено распределение суммарного числа фотонов, привязанное по времени к синхронизирующему импульсу. Находилось суммарное число фотонов, зарегистрированных в равные промежутки времени 32 нс по 640000 записанным реализациям импульса

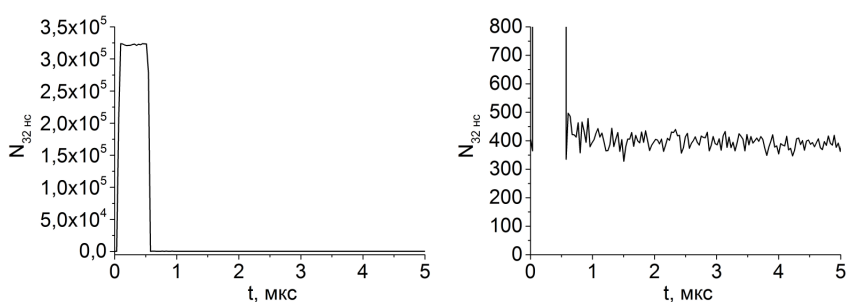


Рисунок 8. Форма оптического импульса.

На диаграмме формы импульсов заметно отсутствие переходных процессов, что согласуется с работой генератора импульсов с плоским дном согласно предложенной модели.

В подразделе 4.4 исследован метод определения экстинкции оптического импульса с использованием нелинейного детектора, обладающего нелинейной зависимостью выходного напряжения от входной мощности оптического сигнала. Схема детектора, зависимость напряжения на выходе от входной мощности и характерная кривая зависимости напряжения на выходе от времени при детектировании импульса с высокой экстинкцией приведены на рис. 9(а-в). В качестве VD1 использовался фотодетектор PD-1355-ir.

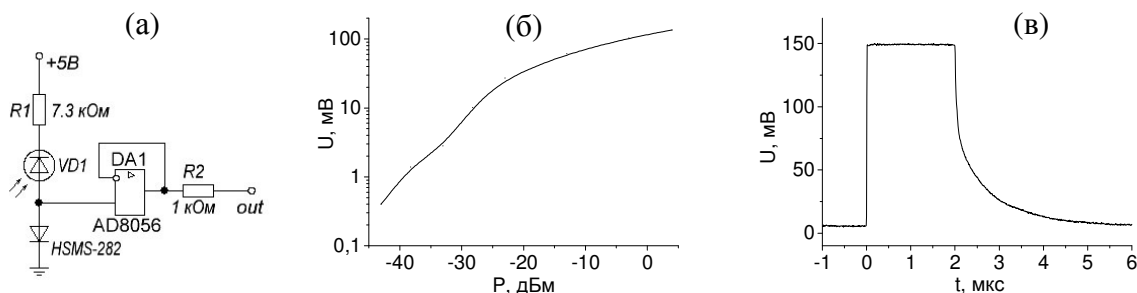


Рисунок 9. Схема нелинейного детектора (а), зависимость напряжения на выходе от входной мощности (б) детектора. Характерная кривая зависимости напряжения на выходе детектора от времени при детектировании импульса с высокой экстинкцией (в).

Сопоставление характерной зависимости напряжения на выходе детектора от времени с данными зависимости напряжения от мощности даёт время установления после окончания импульса по уровню соответствующему экстинкции 40 дБ не превышающее 3 мкс.

В подразделе 4.5 предложен метод стабилизации рабочей точки модулятора основанный на применении нелинейного от входной мощности детектора с усреднением. Часть оптического сигнала с выхода модулятора ответвлялась с использованием -3 дБ делителя оптической мощности и поступала на нелинейный детектор, на выходе которого находился RC-фильтр с постоянной времени 30 мс. Результирующий сигнал с детектора в качестве сигнала ошибки поступал на модуль АЦП/ЦАП, управляемый с ПК. Сигнал с ЦАП усиливался и поступал на bias-вход модулятора. Путём изменения напряжения выхода ЦАП на основании сигнала ошибки, выполнялась подстройка рабочей точки модулятора в область, при которой максимизируется экстинкция оптических импульсов на выходе.

В результате была достигнута стабилизация рабочей точки, при которой экстинкция оптических импульсов длительностью 1 мкс и частотой 100 кГц превышала 40 дБ.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты работы.

- Проведенные теоретические исследования продемонстрировали взаимосвязь характеристик модуляторов с возможностями и ограничениями технологии их изготовления. Разработаны методы поиска оптимальных характеристик модуляторов с учетом ограничений технологических процессов и компромиссов между различными параметрами. В частности, показана возможность расширения полосы частот при увеличении проводимости материала электродов и изучено влияние наклона стенок электродов.

- Показана возможность повышения коэффициента передачи радиофотонной линии за счет выбора оптимальной рабочей точки модулятора без необходимости улучшения характеристик оптических компонентов.

- Показано, что электрооптические модуляторы на подложках ниобата лития могут эффективно использоваться для генерации оптических импульсов с высокой экстинкцией при использовании метода стабилизации рабочей точки, основанного на нелинейном детектировании.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaminow I. Optical Waveguide Modulators // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1975. Vol. 23, № 1. P. 57–70.
2. Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications. 1 edition / ed. Chen A., Murphy E. Boca Raton: CRC Press, 2011. 568 p.
3. Boudrioua A. Photonic Waveguides. 1 edition. Wiley-ISTE, 2013. 320 p.
4. Ridgway R.W., Dohrman C.L., Conway J.A. Microwave Photonics Programs at DARPA

// J. Light. Technol. 2014. Vol. 32, № 20. P. 3428–3439.

5. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 96th Edition. 96 edition. CRC Press, 2015. 2677 p.

6. Fowler A.M. Radio Frequency Performance of Electroplated Finishes, Proc. I.R.E.E. Australia, Vol. 31, No. 5, May, 1970.pdf // Proc IREE Aust. 1970. Vol. 31, № 5. P. 148–164.

7. Wissmann P., Finzel H.-U. Electrical resistivity of thin metal films. Berlin ; New York: Springer, 2007. 126 p.

8. Bonnedal D. Single-setup characterization of optical fiber amplifiers // IEEE Photonics Technol. Lett. 1993. Vol. 5, № 10. P. 1193–1196.

9. Schoenwetter H.K. High-Accuracy Settling Time Measurements // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1983. Vol. 32, № 1. P. 22–27.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лебедев В.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В. Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 17. С. 39–46.

2. Петров А.Н., Тронеv А.В., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Величко Е.Н., Шамрай А.В. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 131–136.

3. Petrov A., Ilichev I., Agruzov P., Lebedev V., Velichko E., Shamray A. Influence of external electrooptical modulator biasing on gain and nonlinear distortions in analog fiber-optic links // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 541. № 1. P. 12047.

4. Petrov A., Tronev A.V., Lebedev V., Ilichev I.V., Velichko E., Shamray A. High dynamic extinction ratio and pulse modulation of optical signals // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 643. № 1. P. 12038.

5. Лебедев В.В., Ильичев И.В., Каретко В.С., Шамрай А.В. Анализ конфигурации интегрально-оптического СВЧ модулятора // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 2016. С. 352–356.

6. Lebedev V., Tronev A., Petrov A., Agruzov P., Ilichev I., Shamray A. Generation of high extinction optical pulses by means of LiNbO₃ Mach-Zehnder modulators // 2016 International Conference Laser Optics (LO), 2016. P. R8-49-R8-49.