УДК 681.787

Интегрально-оптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера с асимметричной топологией волноводов

Вобликов Е.Д., Волынцев А.Б., Журавлев А.А., Кичанов А.В., Пономарев Р.С., Шевцов Д.И.

Аннотация

Статья посвящена численному исследованию и приложениям интегрально-оптического интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) с асимметричной топологией расположения волноводов. С помощью метода распространяющегося луча рассматривается зависимость положения рабочей точки ИМЦ от топологии волноводов и ширины волноводных каналов. По результатам численного моделирования изготовлены экспериментальные образцы ИМЦ с асимметричной топологией волноводов, экспериментально определено положение рабочих точек пяти различных топологий ИМЦ. Проведено сопоставление теоретических результатов с результатами испытаний полученных образцов.

Ключевые слова: интегрально-оптический фазовый модулятор; интерферометр Маха-Цендера; рабочая точка; асимметричная топология, ниобат лития, протонный обмен

Введение

В связи с ростом объемов передаваемой информации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) имеют ряд преимуществ для авиации: малый вес и объем, невосприимчивость к электромагнитным наводкам, полная взрывобезопасность, широкая полоса пропускания. Замена медных проводников волоконными световодами позволит не только снизить вес и повысить надежность летательных аппаратов, но и снизить общую стоимость системы передачи информации воздушного судна, что является важным фактором для отрасли гражданской авиации. Также на основе компонентов интегральной и волоконной оптики возможно создание сенсоров и систем мониторинга таких физических величин как напряженность электрического и магнитного поля, температура, давление, газовый состав

атмосферы и др. В данной работе особое внимание уделено электрооптическим модуляторам для целей ВОЛС и диэлектрическим датчикам напряженности электрического поля.

Для преобразования электрического сигнала в оптический сигнал, передаваемый по волоконному световоду используется электрооптический модулятор. В основе модулятора лежит интегрально-оптический интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ), оснащенный системой электродов. При подаче переменного напряжения на систему электродов происходит модуляция фазы оптического излучения под действием эффекта Поккельса. Схема интерферометра включает в себя два Y-разветвителя, соединенных прямолинейными участками волноводов. Топология волноводов ИМЦ создается на поверхности монокристалла ниобата лития (НЛ) методом протонного обмена в бензойной кислоте. Ниобат лития обладает высоким электрооптическим коэффициентом r_{33} и высокой температурой Кюри [1]. Разность показателей преломления волновода и подложки или контрастность волновода составляет 0.01 [2].

При распространении излучения вдоль плеч интерферометра может возникать дополнительная разность фаз, величина которой зависит от длины оптического пути волновода. Длина оптического пути определяется не только физической длиной волновода, но и его показателем преломления, который может изменяться под действием электрического поля.

Передаточной функцией интерферометра называется зависимость выходной интенсивности излучения от набегающей в плечах разности фаз (рис.1). Для ИМЦ передаточная функция пропорциональна косинусу разности фаз. Рабочей точкой (РТ) интерферометра называется то положение на передаточной функции, которое соответствует имеющейся в интерферометре постоянной разности фаз. При равной оптической длине плеч интерферометра РТ находится в максимуме передаточной функции, что соответствует нулевой разности фаз. Такое положение РТ соответствует участку с максимальной кривизной передаточной функции и вызывает искажение передаваемого сигнала [3]. Для устранения имеющихся недостатков необходимо смещение рабочей точки интерферометра в положение, соответствующее линейному участку на передаточной функции. Это смещение называется смещением в квадратуру и может быть проведено несколькими методами. Как видно из графика на рис. 1, при смещении рабочей точки в квадратуру выходная интенсивность излучения равна половине входной интенсивности, что соответствует оптическим потерям в 3 дБ. При этом часть излучения, не прошедшая в волноводный канал, рассеивается при деструктивной интерференции. Рассеянное излучение путем многократных

отражений может попадать в волоконный световод, снижая величину глубины модуляции системы.

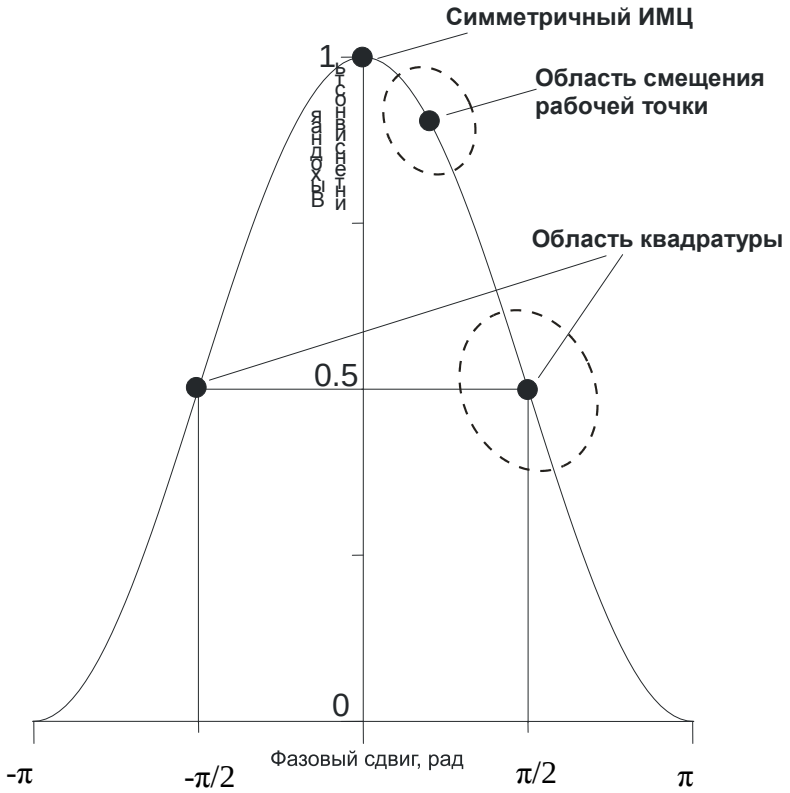

Рис. 1 Передаточная функция ИМЦ и различные положения рабочей точки

При работе с сигналами небольшой амплитуды возможно смещение рабочей точки ИМЦ не в середину линейного участка, а в область вблизи максимума. Такой вариант смещения позволяет считать передаточную характеристику линейной для сигналов, не превышающих по амплитуде некоторое пороговое значение и при этом уменьшить нежелательные эффекты, связанные с рассеянием излучения и ростом оптических потерь.

Выбор способа смещения рабочей точки ИМЦ

Существует два основных способа смещения рабочей точки ИМЦ на линейный участок передаточной функции:

1. Приложение постоянного электрического поля с помощью дополнительной системы электродов.
2. Создание несимметричных (с разной физической длиной плеч) ИМЦ.

Для приборов с динамическим смещение рабочей точки стандартным методом является приложение постоянного электрического поля [4]. Отрицательной стороной данной технологии является необходимость в отдельном стабильном источнике питания и дополнительной системе управляющих электродов. К преимуществам данного метода можно

отнести возможность динамического изменения положения рабочей точки ИМЦ, что бывает необходимо в навигационных системах, в частности, при работе волоконно-оптического гироскопа.

Для приборов с фиксированным положением рабочей точки (датчики на основе ИМЦ и модуляторы ВОЛС) наилучшим является второй метод – создание ИМЦ с асимметричной топологией волноводов. При таком способе смещения не требуется отдельных источников питания, параметры ИМЦ полностью определяются на стадии разработки и производства, обеспечивается стабильность положения рабочей точки интерферометра. Однако, приведенный способ производства ИМЦ предъявляет высокие требования к качеству изготовления фотошаблона, в котором должна соблюдаться субмикронная точность создания волноводных каналов. Таким образом, для решения поставленной задачи изготовления ИМЦ с постоянным смещением рабочей точки в линейную область передаточной функции необходимо провести моделирование работы ИМЦ с асимметричной топологией волноводов.

Результаты численного моделирования топологии ИМЦ

Численное моделирование топологии ИМЦ проводилось в САПР BPM CAD в режиме 2D. Данный пакет использует метод распространяющегося луча (beam propagation method), в основе численной модели лежит уравнение Гельмгольца:

$$(\Delta + k^2 n^2) E(\vec{r}) = 0$$

Для его решения в приближении параксиальной волны (Paraxial Wave Approximation) и медленно меняющихся огибающих (Slowly Varying Envelop Approximation) использовалась неявная, абсолютно устойчивая схема Кранка – Николсона для метода конечных разностей.

Для численного моделирования ИМЦ была спроектирована топология волноводов с учетом особенностей распределения профиля показателя преломления, возникающего при протонном обмене в бензойной кислоте. Для проведения численных экспериментов были выбраны следующие параметры области моделирования: длина области составляла 55 мм, ширина области составляла 0.25 мм. Выбранные параметры являются типичными для телекоммуникационных и других видов ИМЦ. Для создания асимметричной топологии, обеспечивающей необходимое положение рабочей точки, одно плечо интерферометра было спроектировано со сдвигом относительно оси перпендикулярной направлению распространения света. Общая схема интерферометра приведена на рис. 2

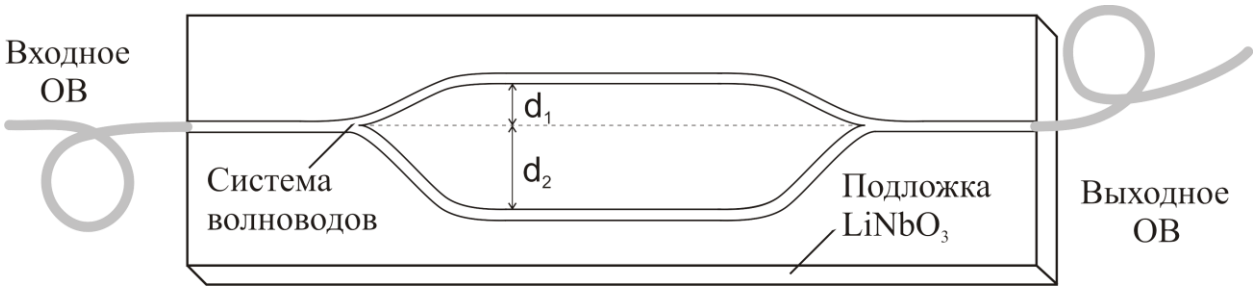

Рис. 2 Топология асимметричного ИМЦ

Данный вариант смещения Р.Т. обеспечивает при численном моделировании наилучшие результаты по плавности изменения положения рабочей точки. Также было проведено моделирование асимметричных топологий со смещением волноводов вдоль оси распространения света и с измененной кривизной изгибного участка.

Для моделируемой топологии ИМЦ отклонение от срединной линии d_1 составило 30 мкм, d_2 варьировалось в пределах от 30 мкм до 55 мкм. На рис.3 представлены графики расчетной выходной интенсивности ИМЦ в зависимости от величины разбалансировки $\Delta l = d_2 - d_1$.

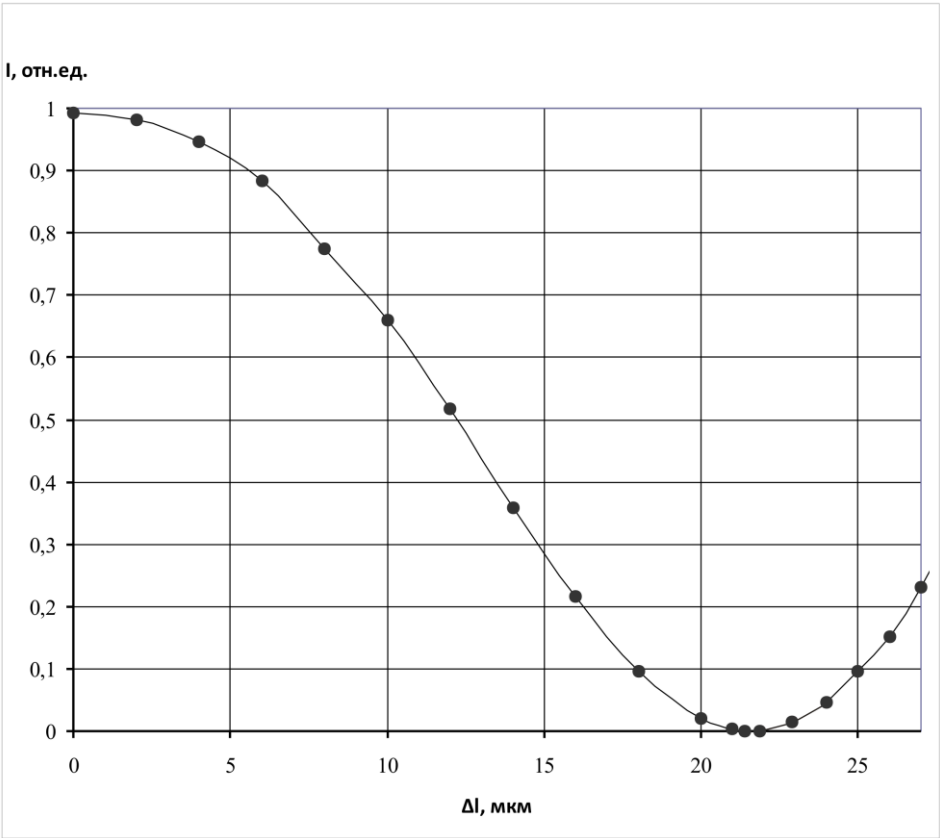

Рис. 3 Зависимость выходной интенсивности ИМЦ от разбалансировки плеч интерферометра

Таким образом, для производства экспериментальных образцов была выбрана топология ИМЦ с величиной разбалансировки плеч от 7 до 13 мкм для смещения рабочей точки в квазилинейную область передаточной функции.

Сопоставление расчетных и реальных параметров волновода

Ширина волноводов w при численном моделировании составляла 3,0 мкм при используемой длине волны 1,55 мкм. Такое значение ширины волноводного канала обусловлено необходимостью работы интерферометра в одномодовом режиме. При увеличении ширины волноводов наблюдается появление мод высших порядков, что ведет к ухудшению выходных характеристик модулятора.

Значение расчетной ширины волновода получено из серии дополнительных численных экспериментов для топологий модулятора с известными свойствами. На рис. 4 приведены результаты измерения выходной интенсивности ИМЦ в зависимости от ширины волноводного канала. Степень разбалансировки интерферометра подобрана таким образом, чтобы результирующая разность фаз вызывала полную деструктивную интерференцию и при работе в одномодовом режиме выходная интенсивность излучения равнялась нулю (режим работы с максимальной глубиной модуляции).

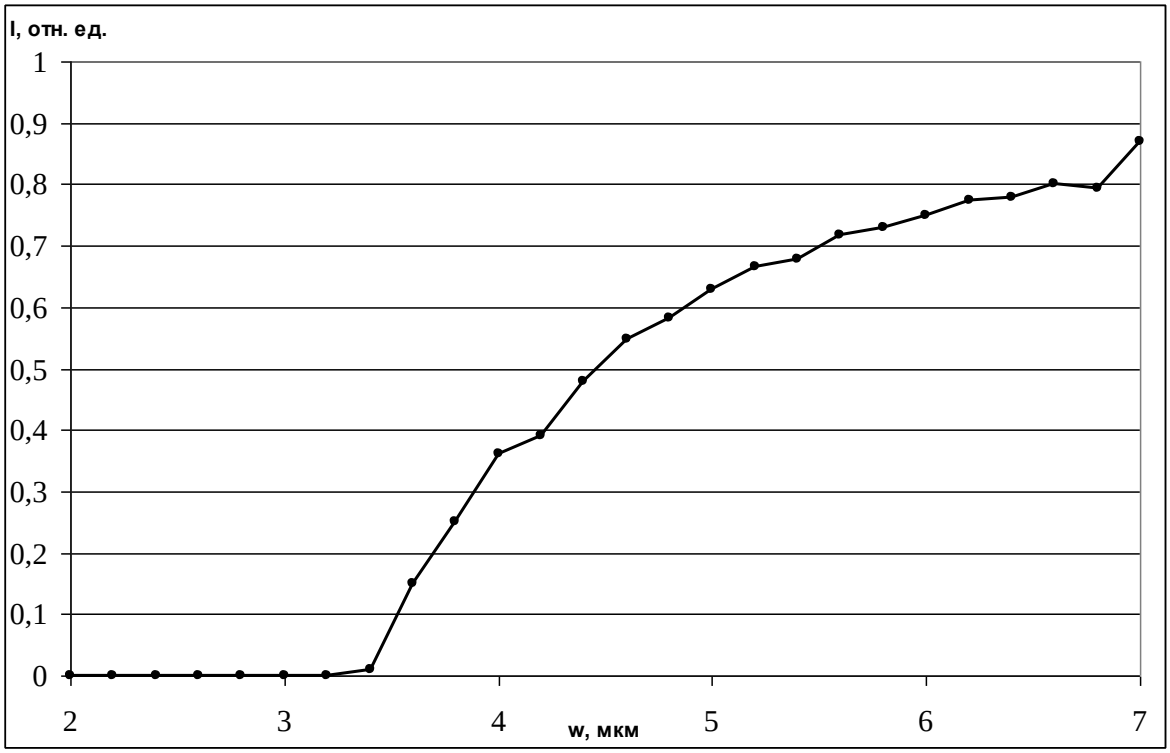

Рис. 4 Зависимость выходной интенсивности ИМЦ от ширины волноводного канала

Как видно из графика минимальное значение выходной интенсивности достигается при ширине волноводного канала около 3.4 мкм. При дальнейшем уменьшении ширины волновода значение выходной интенсивности не изменяется.

Реальная полуширина модового пятна волновода составляла около 6 мкм. Несоответствие расчетной и экспериментальной ширины волноводного канала объясняется параметрами применяемой численной модели, в которой использовался ступенчатый профиль показателя преломления. В реальности во время протонного обмена и отжига формируется градиентный профиль показателя преломления, который определяет диаметр модового пятна [5].

Экспериментальная установка

Для проверки численных расчетов была изготовлена серия образцов ИМЦ с асимметричной топологией расположения волноводов, обеспечивающей смещение рабочей точки интерферометра в область между серединой линейного участка и максимумом передаточной функции. Для перекрытия диапазона значений разбалансировки было предложено изготовить ИМЦ с Δl от 7 до 14 мкм (см. рис. 2).

Экспериментальная установка для исследования параметров ИМЦ представляет собой стенд, в котором вакуумным способом закрепляется чип с заранее сформированной системой волноводных каналов для нескольких ИМЦ и системой электродов для подачи напряжения смещения. Свет от перенастраиваемого источника излучения EXFO FLS-2600 подводился с помощью входного волоконного соединителя. Для проведения экспериментов использовалась длина волны излучения 1,55 мкм. Выходная интенсивность фиксировалась с помощью фотоприемника и усилителя. Плоскопараллельность чипа и волоконных соединителей контролировалась с помощью автоколлиматора АКТ-60. Для подведения излучения использовались волоконные световоды типа «Panda» сохраняющие поляризацию излучения. Неточность юстировки выхода волновода и входа волоконного соединителя не превышала 0,5 мкм. Для юстировки использовались микроподвижки NanoMax TS 3-Axis MAX300 фирмы Tholabs.

Измерение положения рабочей точки ИМЦ проводилось с помощью подачи квазипостоянного напряжения на систему электродов модулятора. Подаваемое напряжение варьировалось с помощью переменного резистора. В качестве малошумящего источника питания использовалась батарейка типа «Крона», обеспечивающая размах по напряжению ±9 В, достаточный для изменения положения рабочей точки ИМЦ в широких пределах.

Методика измерения положения рабочей точки ИМЦ состояла в нахождении максимального и минимального значения выходной интенсивности излучения и соответствующих значений подаваемого напряжения смещения. При сопоставлении полученных данных со значением выходной интенсивности излучения при закороченных

электродах, т.е. только при собственном смещении рабочей точки ИМЦ за счет асимметричной топологии, определялось истинное положение рабочей точки на передаточной кривой. Измерение и максимального и минимального значения интенсивности излучения необходимо ввиду наличия разности в эффективности модуляции $V\pi$ для разных ИМЦ. Для исследуемых образцов $V\pi$ составляет от 7 В до 9 В для системы коротких электродов. При нормировании результатов на $V\pi$ положение рабочих точек для всех образцов может быть отложено на одной кривой, размеченной в угловых единицах по оси абсцисс.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В ходе эксперимента было проведено измерение положения рабочей точки пяти ИМЦ с разной топологией расположения волноводов. Величина разбалансировки Δl составила соответственно 7 мкм, 8 мкм, 9 мкм, 12 мкм и 14 мкм. На рис. 5 приведены результаты экспериментального измерения положения рабочих точек на передаточной кривой для различных топологий ИМЦ.

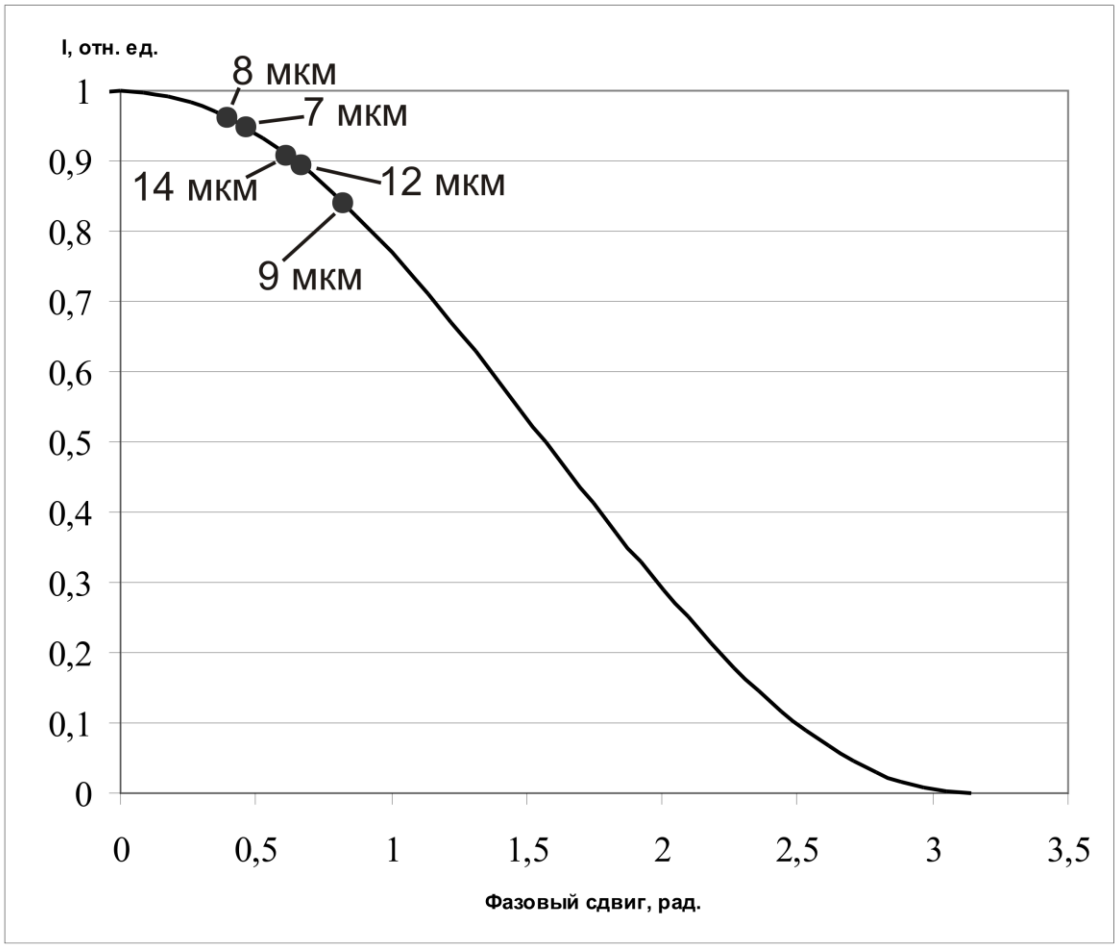

Рис. 5 Положение рабочих точек для различных топологий ИМЦ (эксперимент)

Из рисунка видно, что рабочие точки всех образцов оказались в промежутке между максимумом и серединой линейного участка передаточной функции. При сранении с графиком на рис. 3 становится ясно, что для каждой топологии ИМЦ рабочая точка смещена в сторону максимума передаточной функции в сравнении с расчетным значением. Такой результат может объясняться не полным соответствием численной модели и реальных свойств волноводов. Нелинейность в расположении рабочих точек на передаточной кривой может быть объяснена недостаточной точностью технологического процесса производства ИМЦ. В целом результаты экспериментов показали адекватность применяемой численной модели и удовлетворительное соответствие данных эксперимента теоретическим расчетам.

Выводы

В результате работы был спроектирован и изготовлен ряд модуляторов интенсивности на основе интерферометра Маха-Цендера с асимметричной топологией расположения волноводов. При проектировании была использована численная модель распространения света в канальном волноводе на основе метода распространяющегося луча. В ходе работы определена максимальная ширина волноводного канала, при которой распространение излучения происходит в одномодовом режиме, проведено сравнение с реальной шириной волноводного канала, получаемого методом протонного обмена в ниобате лития.

На основе результатов численного моделирования изготовлено 5 образов ИМЦ с различной степенью разбалансировки плеч. Для проведения измерения положения рабочей точки собран лабораторный стенд, пригодный для проведения ряда измерений интегрально-оптических компонентов (эффективность модуляции, глубина модуляции, оптические потери, поляризационная экстинкция и др.). На основании полученных данных можно сделать вывод о применимости использованной численной модели для проектирования реальных интегрально-оптических схем на основе протонообменных волноводов на ниобате лития. Удовлетворительное соответствие результатов численного моделирования и эксперимента подтверждает правильность найденного значения ширины волноводного канала, применяемой в численном моделировании. Некоторое несоответствие теоретических и расчетных данных требует проведения серии дополнительных экспериментов и уточнения применяемой теоретической модели в соответствии с ними.

Полученные результаты могут применяться для производства модуляторов интенсивности для систем передачи данных и сенсоров на основе компонентов интегральной оптики.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства интегрально-оптических схем на ниобате лития для волоконно-оптических гироскопов и систем мониторинга электрического поля и биопотенциалов» № 13.G25.G25.31.0004, реализуемого Пермской научно-производственной приборостроительной компанией и ГОУ ВПО «Пермский Государственный Университет» в соответствии с постановлением правительства РФ №218 от 9 апреля 2010 года.

Библиографический список

[1] Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987.

[2] И.С. Азанова, А.Б. Волынцев, И.Ф. Тайсин, Д.И. Шевцов Метастабильные фазы в протонообменных волноводах на x-срезе ниобата лития // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 6. С. 1059-1063.

[3] Ruske J.-P., Tünnermann A. New applications for integrated optical devices // Photonic international. 2007. №1.p.122-125

[4] Андронова И.А., Малыкин Г.Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка // УФН. - 2002. - Т. 172. Вып.8.-Р.849-873

[5] Азанова И.С., Жундриков А.В., Кичигин В.И., Петухов И.В., Шевцов Д.И. Эффект старения протонообменных оптических волноводов на основе кристаллов ниобата лития // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. № 7. С. 1451-1453.

Сведения об авторах

ВОБЛИКОВ Евгений Дмитриевич, инженер- исследователь Пермской Научно-Производственной Приборостроительной Компании (ПНППК), магистр физики:
тел.: (342) 2640073: e-mail: eugvobler@rambler.ru

ВОЛЫНЦЕВ Анатолий Борисович, зав. кафедрой физики твердого тела ПГУ, доктор физико-математических наук, профессор, тел.: +79082717038; e-mail: voland@psu.ru

ЖУРАВЛЕВ Антон Александрович, студент ПГТУ, тел.: (342) 2640073;
e-mail: anton3424@mail.ru

КИЧАНОВ Александр Вячеславович, инженер-исследователь ПНППК,
тел.: (342) 2640073; e-mail: kichanov@ppk.perm.ru

ШЕВЦОВ Денис Игоревич, ассистент кафедры физики твердого тела ПГУ, кандидат физико-математических наук, тел.: +796175796478; e-mai: shevts@psu.ru

ПОНОМАРЕВ Роман Сергеевич, ассистент кафедры физики твердого тела ПГУ, аспирант;
тел: +79504717731; e-mail:kuperok2003@mail.ru