

УДК 681.7.06; 681.7.068.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА В-СПЛАЙНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА Х-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДИФфуЗИИ ТИТАНА В ПОДЛОЖКАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

В.С. Серебрякова, Г.Б. Дейнека

Предложен численный метод расчета параметров интегрально-оптических элементов с применением эрмитового набора В-сплайнов. Метод использован для определения технологических параметров изготовления Ti:LiNbO<sub>3</sub> разветвителей Х-типа с заданным коэффициентом деления. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** канальный оптический волновод, Х-разветвитель, метод конечных элементов, В-сплайны, коэффициент деления.

Важнейшей характеристикой интегрально-оптического разветвителя является коэффициент деления мощности излучения. Коэффициент деления зависит от профиля моды канальных оптических волноводов (КОВ), от технологических параметров изготовления и от геометрии волноводов и обычно подбирается экспериментально. Проведенный анализ литературы в области методов расчета волноводов и интегрально-оптических разветвителей не дает исчерпывающей информации о процессе получения заданных характеристик волноводов и направленных ответвителей на их основе. На сегодняшний день существуют различные методы численного моделирования распространения излучения в КОВ. Эти методы используют трудоемкую и неоднозначную практику разбиения пространства на неравномерную сетку с триангулярными элементами [1, 2]. Поэтому важно иметь метод, который теоретически описывает зависимость оптических свойств интегрально-оптического элемента (ИОЭ) от технологических параметров его изготовления и геометрии шаблона.

Цель работы заключается в разработке численного метода определения характеристик интегрально-оптических Х-разветвителей с заданным коэффициентом деления на основе моделирования распространения излучения в КОВ с учетом физических процессов формирования волноводов.

Предложен метод расчета канальных КОВ и ИОЭ на равномерной сетке финитных элементов [2]. На его основе разработан программный продукт с окном визуализации для вывода графической информации и возможностью ввода и корректировки параметров. Основным достоинством метода является применение в качестве базиса эрмитового набора гладких В-сплайнов [3], что избавляет от необходимости построения на каждом узле индивидуальной базисной функции и сводится к построению равномерной сетки, в каждом узле которой находится произведение одномерных базисных функций. Математическая модель, положенная в основу предлагаемого метода, заключается в решении уравнения Гельмгольца в приближении малых изменений показателя преломления в направлении распространения [4] и позволяет решать частные задачи из фундаментальных соотношений. Метод, изложенный авторами в работе [2], который сводит решение уравнения Гельмгольца к матричной задаче, распространен на трехмерный случай. Пересчет поля в направлении распространения излучения осуществляется с помощью приближения Кранка–Никольсона [4], модифицированного для работы с матричными уравнениями.

Поставлена задача – добиться заданного коэффициента деления  $K_{division} = 50:50\%$  Х-разветвителей, эскизы шаблонов которых приведены на рис. 1, а, б. Для расчетов выбрана технология диффузии титана в подложки ниобата лития х-среза. В качестве варьируемых параметров для расчетов были выбраны время диффузии  $t$ , расстояние между каналами  $d$  и длина взаимодействия  $L$ . Температура диффузии ( $T=1000^\circ\text{C}$ ), ширина каналов ( $W=8$  мкм) и толщина титановой полоски ( $H=89$  нм) приняты неизменными. Распределение показателя преломления в области диффузии принято в соответствии с формулами, полученными путем математической обработки экспериментальных результатов для диффузии титана в ниобат лития х-среза [1].

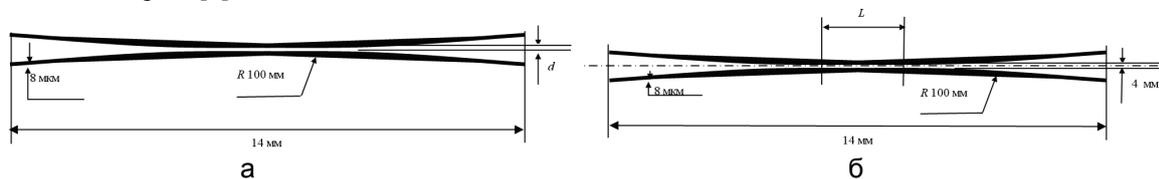


Рис. 1. Эскиз шаблона центральной части Х-разветвителя: без прямого участка связи, но с варьируемым расстоянием между каналами  $d$ , мкм (а); с прямым участком взаимодействия  $L$ , мм (б)

На первом этапе моделирования рассчитывается эффективное время диффузии (фиксированная температура диффузии  $T=1000^\circ\text{C}$ ), при котором параметры созданных каналов таковы, что энергия излучения с минимальными потерями из одного канала переходит в противоположный вводу канал (при  $L=0$ ,  $d=4$  мкм). При коэффициенте деления  $K_{division} = 8,2\%:91,8\%$  эффективное время диффузии составляет  $t_{eff}=45$  час. В качестве исходного распределения поля выбирается основная мода одного канала, вычисленная как решение уравнения Гельмгольца [2]. Разработанная программа позволяет визуализировать двумерное распределение интенсивности в любом сечении  $z$  в относительных единицах при прохождении излучения вдоль направления распространения [2].

На следующем этапе моделирования рассматриваются два способа получения заданного коэффициента деления (температура диффузии  $T=1000^{\circ}\text{C}$  неизменна, а эффективное время диффузии  $t_{eff}=45$  часов). В первом случае заданный коэффициент деления можно получить, изменяя расстояние между волноводами  $d$  (рис. 2, а). Во втором случае добиться заданного значения коэффициента деления можно, увеличивая длину взаимодействия  $L$  (рис. 2, б).

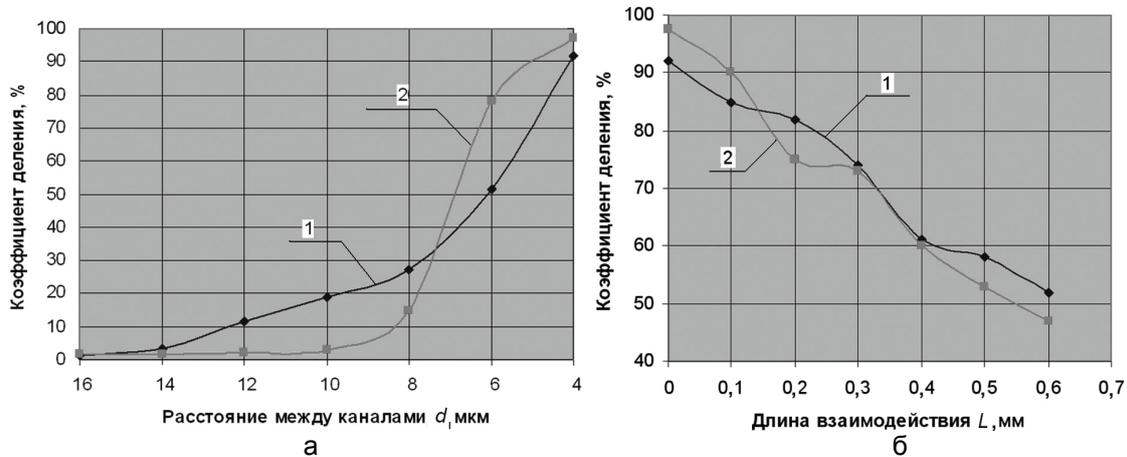


Рис. 2. Зависимость коэффициента деления: от расстояния между каналами  $d$  (а); от длины взаимодействия  $L$  (б) (1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные данные)

В лаборатории квантовой электроники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе изготовлены опытные образцы Х-разветвителей по технологии диффузии титана в подложку ниобата лития х-среза, топология которых показана на рис. 1, а, б. Образцы выполнены в соответствии с техническими условиями ВДАМ.203728.001ТУ и параметрами диффузии, полученными при расчетах. Сравнение оптических характеристик опытных образцов Х-разветвителей с результатами моделирования показало, что использованная математическая модель адекватно описывает физические процессы формирования Х-разветвителей (рис. 2, а, б).

В ходе работы было проведено моделирование распространения излучения в титан-диффузионных Х-разветвителях на подложках из ниобата лития и изготовлены экспериментальные образцы. Представленные результаты расчета таких Х-разветвителей показали хорошее соответствие характеристикам экспериментальных образцов для случая изменения длины взаимодействия  $L$ . Среднее значение отклонения от экспериментальных данных в этом случае составило 2,8 %. Предложенный метод позволяет рассчитывать технологические параметры изготовления интегрально-оптических Х-разветвителей с заданным коэффициентом деления.

1. Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 49. – С. 42–53.
2. Дейнека Г.Б., Серебрякова В.С. Расчет канального оптического волновода с произвольным распределением показателя преломления с применением эрмитового набора В-сплайнов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 68. – С. 6–10.
3. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
4. Lifante Gin'es. Integrated photonics: Fundamentals. Wiley&Sons Ltd, 2003. – 198 p.

**Серебрякова Владлена Сергеевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, vlladllena@mail.ru

**Дейнека Геннадий Борисович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, gdeineka@yahoo.com