09

Математическое моделирование и экспериментальное исследование характеристик оптических элементов кремниевых фотонных интегральных схем

© Г.А. Лемешевская,[1] П.В. Волков,[2] А.В. Нежданов,[1] Д.Е. Николичев,[1] А.И. Бобров,[1] К.В. Сидоренко,[1] А.А. Скрылев,[1] О.С. Вязанкин,[2] Д.А. Семиков[2]

[1]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Научно-исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород, Россия
[2]Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
e-mail: lemeshevskaya@unn.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2026 г.
В окончательной редакции 29 сентября 2026 г.
Принято к публикации 7 октября 2026 г.

Представлены результаты комплексного исследования кремниевых фотонных интегральных схем. Основное внимание уделено оптимизации характеристик таких планарных оптических элементов, как волноводы, делители излучения, дифракционные решетки и термооптические фазовращатели. Методология исследования сочетает математическое моделирование (с использованием ANSYS Lumerical и COMSOL Multiphysics) с практическим экспериментом. Установлено, что использование гребенчатых волноводов снижает оптические потери до 5.5 dB/cm по сравнению с 11.4 dB/cm в обычных канальных волноводах. Разработаны эффективные конструкции Y- и X-делителей с оптимизированными параметрами. Дифракционные решетки неполного травления продемонстрировали эффективность на уровне 30 %, что соответствует теоретическому пределу для структур с использованной топологией. Термооптические фазовращатели обеспечили фазовый сдвиг на π при напряжении до 5 V.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, фотонные интегральные схемы, интерферометр Маха–Цендера, термооптический эффект, оптические потери, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64188.293-25

Введение

Перспективы применения фотонных устройств обширны. В настоящее время они охватывают широкий спектр областей, таких как телекоммуникации, информационные технологии, медицина и др. Сравнительно недавно были предложены оптические вычислительные системы [1,2], выполняющие векторно-матричные преобразования с когерентными оптическими сигналами. Подобные фотонные устройства существенно раздвигают горизонты применения интегральной оптики, в том числе для решения таких прикладных задач, как, например, построение многолучевых диаграмм направленности фазированных антенных решеток (ФАР) [3]. Применяемые для этих целей фотонные интегральные схемы (ФИС) строятся на основе простой и эффективной конструкции интерферометра по схеме Маха–Цендера (ИМЦ) [4,5,6]. В них за счет изменения разности фаз интерферирующих волн можно осуществлять управление интенсивностью проходящего оптического сигнала.

Вариативная комбинация ИМЦ в фотонных интегральных схемах вместе с другими оптическими компонентами позволяет создавать аналоговые фотонные вычислительные устройства (АФВУ). В них выполняется преобразование интенсивности между оптическими входами и выходами ФИС, согласно заданным математическим алгоритмам [1,2], определяемым топологией ФИС и состоянием управляемых фазовращателей.

Наиболее широко распространенными материалами для создания ФИС на сегодняшний день являются ниобат лития ($LiNbO_3$) [7,8] и фосфид индия (InP) [9,10]. ИМЦ на базе указанных материалов используют в основном электрооптический эффект Поккельса, за счет чего достигается высокое быстродействие приборных структур, вплоть до 100 GHz. Такая частота позволяет производить электрооптическое преобразование информационных радиосигналов с переносом их на оптическую несущую. Особенно показательно преимущество таких вычислений проявляется в области телекоммуникаций, радио-, спутниковой связи и т. п., где радиочастотный сигнал на оптической несущей может передаваться непосредственно в оптоволоконные линии связи без использования конвертации аналогово-цифровым преобразователем. Дополнительным преимуществом при передаче и обработке сигналов в оптической области является использование широкого спектра длин волн за счет мультиплексирования оптического излучения [11].

С точки зрения технологических процессов, применяемых на предприятиях микроэлектроники, кремниевая фотоника обладает существенным преимуществом. При создании ФИС на основе кремния нет необходимости перестраивать материально-техническую базу производственных линеек и вносить кардинальные изменения в технологические маршруты.

Физические преимущества использования кремния как в качестве основного материала для ФИС определяются его прозрачностью на телекоммуникационной длине волны $1.55\,\mu$m и высоким показателем преломления (~ 3.5) в соответствующем спектральном диапазоне. Указанные характеристики обеспечивают повышенную локализацию оптического излучения в кремниевых волноводах по сравнению с ниобатом лития. В свою очередь, это позволяет создавать компактные оптические приборы с высокой плотностью интеграции, которые демонстрируют стабильные характеристики при изменении внешних условий за счет формирования оптической схемы на кристалле в монолитном исполнении. ИМЦ на основе кремния могут работать за счет термооптического эффекта, который позволяет изменять показатель преломления материала волновода за счет локального разогрева, тем самым обеспечивая модуляцию лазерного излучения [12].

Можно выделить следующие основные части кремниевой ФИС: волноводы, по которым осуществляется передача оптического излучения; разветвители, выполняющие разделение и объединение волн; ИМЦ, управляемые термооптическими фазовращателями; узлы ввода-вывода, обеспечивающие согласование ФИС с оптическим волокном. При этом для создания функциональных АФВУ необходимо обеспечение воспроизводимости оптических параметров перечисленных элементов, что осложнено наличием технологических отклонений топологии от идеальной, заданной математическим моделированием.

Таким образом, актуальной задачей в настоящее время является создание планарных оптических элементов, демонстрирующих устойчивость характеристик вне зависимости от малых искажений их топологии вследствие наличия технологических допусков при производстве ФИС. Для решения этой задачи требуются теоретические подходы к разработке математических моделей вышеупомянутых элементов и экспериментальная верификации точности теоретических расчетов.

1. Методика математического моделирования и эксперимента

В настоящей работе было проведено моделирование и проектирование волноводных систем, сохраняющих свои оптические характеристики вне зависимости от малых отклонений их топологии при изготовлении. Апробация соответствующих конструкций произведена с использованием технологических процессов по топологической норме 350 nm, достаточной для формирования ФИС, в конструкции которых используются ИМЦ с термооптическими фазовращателями.

1.1. Программное обеспечение и математическое моделирование

Для проведения математического моделирования использовались программные пакеты ANSYS Lumerical и COMSOL Multiphysics. Программное обеспечение ANSYS Lumerical с модулем „MODE“ использовалось для получения профиля мод и значения эффективных показателей преломления для них, путем решения уравнения Максвелла на сетке поперечного сечения волновода с применением матричного подхода и алгоритма разреженных матриц, описанных в [13]. Модуль „FDTD“ применялся для решения задачи распространения короткого импульса заданной длины волны за один вычислительный проход.

Перед проведением моделирования строилась требуемая геометрия исследуемого элемента ФИС, включая материал подложки и окружающей среды. Моделируемое пространство окружалось идеально согласованными слоями (perfectly matched layers — PML), которые обеспечивали поглощение рассеянного излучения, имитируя ситуацию с открытым элементом, когда рассеянное излучение уходит во внешнюю область и не отражается обратно от стенок расчетного объема. Для моделирования узлов ввода-вывода на основе дифракционных решеток использовался $2D$-режим, в котором решетка предполагалась бесконечной в направлении штрихов, при этом в качестве источника оптического излучения выбирался гауссов пучок, хорошо аппроксимирующий основную моду одномодового волокна.

Моделирование волноводных структур проводилось в два этапа. Первый этап использовал модуль „varFDTD“ пакета ANSYS Lumerical, в котором реализован метод эффективного показателя преломления, позволяющий свести задачу о распространении излучения через планарную $3D$-структуру к $2D$-геометрии. Поскольку расчет в $2D$-геометрии проводится существенно быстрее, чем в $3D$, то это позволяло использовать оптимизационные методики для поиска приемлемых параметров элемента. После нахождения требуемых параметров они переносились на полную $3D$-модель и вычислялись итоговые характеристики, и при необходимости проводилось дополнительное уточнение параметров для достижения необходимых характеристик. Излучение заводилось в элемент через модовый источник, который генерировал электромагнитную волну с поперечным распределением электрического поля, соответствующим основной моде волновода. Выходящее из элемента излучение принималось модовыми мониторами, осуществляющими вычисление интеграла перекрытия поля волны с полем основной моды. Такой подход позволял имитировать работу элемента внутри протяженной фотонной интегральной

схемы, в которой соединяющие волноводы работают в одномодовом режиме.

Для оптимизационного поиска в пакете ANSYS Lumerical реализован метод роя частиц, позволяющий достаточно эффективно искать глобальный экстремум многопараметрических функций с большим количеством локальных минимумов. Целевой параметр выбирался в зависимости от задачи, например, для дифракционных решеток максимизировалась вводимая в волновод мощность, а для делителей — достижение требуемого коэффициента деления при минимальных потерях.

Для теоретического исследования работы термооптического фазовращателя использовался программный пакет Comsol Multiphysics. В рамках настоящей работы была построена трехмерная модель джоулева разогрева кремниевого оптического волновода вследствие протекания электрического тока через нагреватель. Численный расчет распространения тепла от нагревателя к волноводу проводился с использованием стационарного уравнения теплопроводности и закона Ома, совместное решение которых проводилось методом конечных элементов. Показатель преломления в кремнии имеет квадратичную температурную зависимость, которая была получена эмпирически [14]. Разность фаз проходящего через плечи ИМЦ излучения описывалась известным выражением из теории волн [14]. Используя данное выражение для фазового смещения и полученное в рамках математического моделирования распределение температуры в области волновода, нами была получена зависимость разности фаз между нагретым и ненагретым волноводами от приложенного к контактам нагревателя напряжения.

1.2. Методика эксперимента

По результатам моделирования основных оптических элементов были созданы прототипы ФИС на базе системы „кремний на изоляторе“. При этом использовались стандартные для кремниевой технологии процессы формирования оксидных, нитридных и металлических тонких пленок в совокупности с проекционной фотолитографией и плазмохимическим травлением для получения топологического рисунка.

1.2.1. Растровая электронная микроскопия

Для контроля полученной в результате технологических операций топологии использовался метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) в планарной и поперечной геометрии с ускоряющим напряжением электронного пучка от 3 до 20 kV в режимах регистрации вторичных и обратнорассеянных электронов. Для приготовления поперечного среза использовалась механическая шлифовка торца до интересующей позиции топологического элемента, затем после оптического контроля производилась полировка торца. В случае наличия существенной зарядки поверхности, которая не могла быть скомпенсирована уменьшением энергии электронного зонда и использованием нейтрализатора заряда, применялось напыление тонкого углеродного слоя методом термического испарения.

1.2.2. Измерение оптических и электрических характеристик элементов ФИС

Была сконструирована и собрана оптическая схема, состоящая из: источника излучения с перестройкой по сетке ITU C+L (Zewda, КНР), шести- и трехкоординатных позиционеров с вращающимся держателем оптического волокна (Luminos, Канада), регулятора поляризации OM-PC-MAN-3-1550 (OPEAK, КНР), источника-измерителя Keithley 2400 (Keithley Instruments, США), четырехканального измерителя оптической мощности ZPM817-4N2-1000 (Zewda, КНР). Оптические измерения проводились путем подвода одномодового волокна с сохранением поляризации, с помощью высокоточных позиционеров к входной оптической магистрали. Регулятор поляризации использовался для ее точной подстройки относительно дифракционной решетки волновода. Кремниевая ФИС с контактными группами для нагревателей располагалась на центральном трехкоординатном позиционере. На контактные группы нагревателей подавалось напряжение от источника-измерителя под управлением специализированного программного обеспечения, предназначенного для автоматизации измерений и фиксации выходных параметров (сопротивление нагревателя, ток и напряжение, подаваемые на нагреватель, мощность оптического сигнала на выходе ФИС). Выходная магистраль подключалась напрямую к четырехканальному измерителю оптической мощности.

1.3. Геометрия волноводных систем

Создание качественных волноводов с минимальными потерями является главным этапом в разработке ФИС, поскольку наличие значительных оптических потерь может привести к искажению и полному изменению информационного сигнала в АФВУ. Прямоугольные (канальные) волноводы (рис. 1, *a*) являются стандартным решением для передачи оптического сигнала и создания на их основе топологических элементов ФИС. В кремниевых волноводах основным источником потерь является рассеяние на шероховатости боковой стенки, поскольку, как видно из рис. 1, *a*, часть оптической мощности локализована возле нее. Шероховатость последних зависит от технологии и определяет степень рассеяния излучения при его распространении в волноводе, что напрямую сказывается на оптических потерях.

Создание гребенчатого профиля волновода (rib-волновод) позволяет снизить оптические потери в планарных оптических элементах [15]. Для проведения сравнительного анализа распространения излучения с длиной 1550 nm в канальном и гребенчатом волноводах были получены расчетные распределения

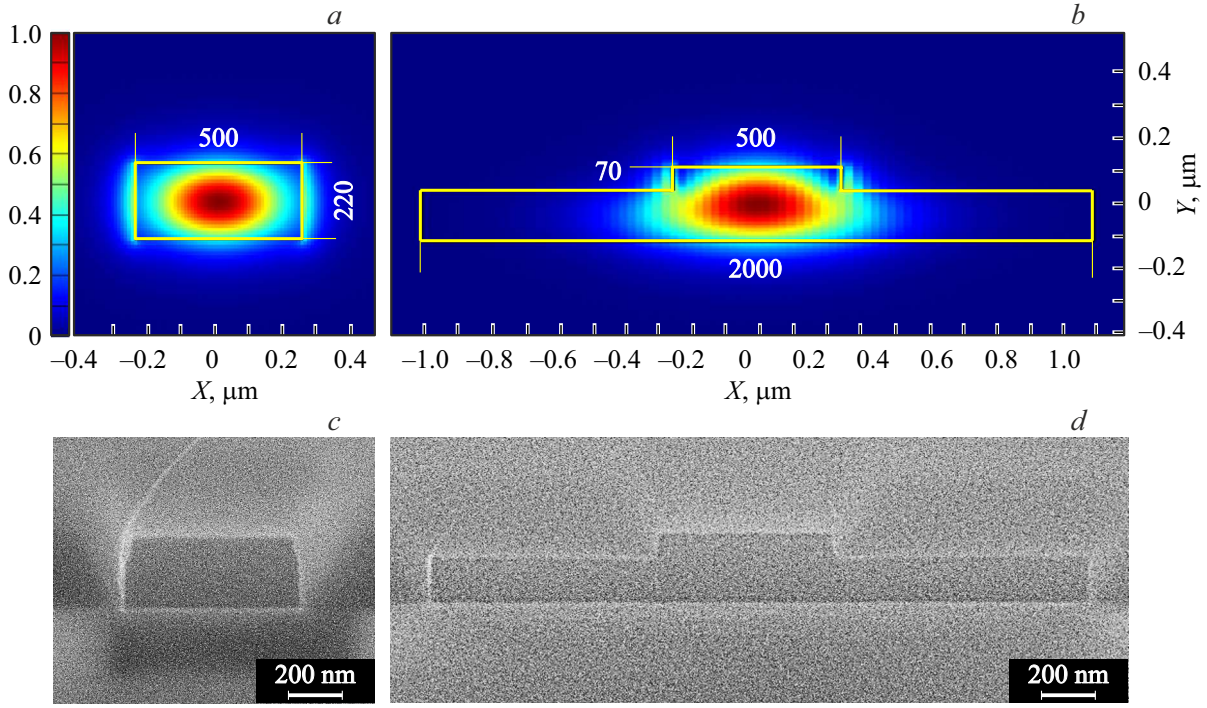


Рис. 1. Математический расчет локализации оптического излучения с длиной волны 1550 nm в кремниевом канальном (a) и гребенчатом (b) волноводах. Ниже приведены соответствующие РЭМ-изображения в поперечной геометрии. Численные размеры приведены в нанометрах. Ступень травления rib-волновода, равная 70 nm, соответствует параметру h_e оптических элементов.

напряженности электрического поля в поперечном сечении волноводов, представленные на рис. 1 a, b.

Гребенчатая структура, реализованная в полученных нами кремниевых ФИС, как показано на рис. 1, b обеспечивает локализацию поля волны под сформированным гребнем, при этом относительная площадь боковой поверхности, взаимодействующей с распространяющейся волной, оказывается существенно меньше по сравнению со случаем канального волновода. И если для оптических элементов, требующих малый радиус закругления (порядка единиц микрометров) применение прямоугольной геометрии является практически безальтернативным, то для прямолинейных участков переход к более сложной геометрии оказывается выигрышным.

Отметим, что для волноводов обеих геометрий на длине волны 1550 nm реализуется одномодовый режим, что позволяет их использовать в произвольных комбинациях. При этом, если ширина гребня rib-волновода совпадает с шириной канального волновода (как приведено на рис. 1), то стык данных волноводов осуществляется с помощью преобразователя, выполненного в топологии адиабатического тейпера (рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента прохождения для такой конструкции от длины согласующего участка L_t.

При длине L_t больше 4 μm расчетные потери на стыковочном соединении оказываются меньше 2%. Для

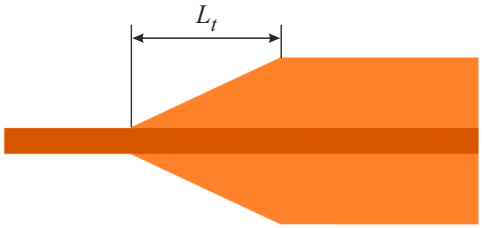


Рис. 2. Схема стыковки канального и гребенчатого волноводов при совпадении ширины канального волновода с шириной гребня.

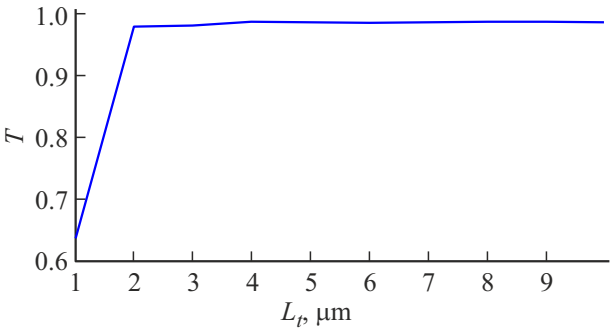


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения через узел стыка канального и гребенчатого волноводов от длины согласующего участка.

обратного перехода данный элемент работает также эффективно.

Таким образом, для обеспечения низкого уровня оптических потерь оптимальным решением видится комбинация канальных волноводов на криволинейный участках топологии и rib-волноводов на прямолинейных участках, а также в делителях различного вида.

Глубина травления в rib-волноводах составляет 60–80 nm [15], что, с одной стороны, позволяет существенно уменьшить рассеяние оптического излучения на шероховатости боковых стенок, а с другой стороны, обеспечивает достаточно хорошую локализацию моды.

1.4. Делители

Одним из базовых компонентов ФИС являются делители оптического излучения, функция которых состоит в разделении и объединении оптических сигналов.

В общем случае могут использоваться разветвители с различным коэффициентом деления, но для создания АФВУ наиболее важным является симметричный вариант, в котором излучение делится в соотношении 50 : 50. При этом отклонение от симметричности приводит к ошибкам в работе вычислительных устройств [16], поэтому достижение равного деления является одним из ключевых при построении АФВУ. Только в случае точной и стабильной работы делителя в ФИС возможно корректное выполнение векторно-матричных преобразований входящего оптического сигнала. Таким образом, к технологическому процессу предъявляются дополнительные требования, связанные с прецизионностью изготовления оптических элементов.

В результате основной целью численного моделирования делителей, проведенного в настоящей работе, являлась оптимизация их топологии для достижения минимальной чувствительности к погрешности изготовления, а также минимальных оптических потерь при распространении моды лазерного излучения.

На первых этапах работы были созданы математические модели Y- и X-делителей [17] на основе стандартных прямоугольных волноводов, схемы которых указаны на рис. 4 с поперечными сечениями, представленными на рис. 1, *a*.

X-делители создавались по схеме направленных ответвителей, представляющих собой два близко расположенных волновода, между которыми происходит перекачка оптической мощности за счет связи мод. Увеличение ширины зазора W приводило к уменьшению коэффициента связи, что, в свою очередь, требовало увеличения длины участка L с параллельно расположенными волноводами. В частности, для зазора в 350 nm длина данной области составила около 150 μm. Сильная зависимость длины от ширины щели и поперечного размера волноводов приводила к значительному расхождению параметров канальных делителей при существующих технологических отклонениях.

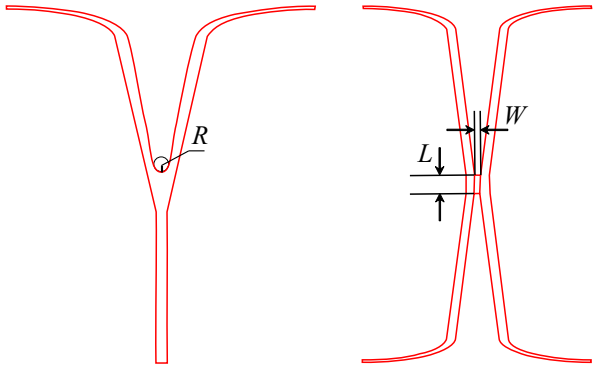


Рис. 4. Схематическое изображение Y- и X-делителя. R — радиус в точке смыкания двухканальных волноводов, L — длина области перекрытия, W — ширина зазора между двумя канальными волноводами.

В случае Y-делителя с прямоугольным поперечным сечением возникновение оптических потерь при делении электромагнитной волны напрямую связано с величиной радиуса R в месте стыковки двухканальных волноводов. Указанные элементы, выполненные по технологическим нормам 350 nm, обеспечивали хорошую ($(50 \pm 2)\,\%$) воспроизводимость деления. При этом они характеризовались повышенными потерями (около 3 dB на делитель), что связано с крупным радиусом в точке стыковки волноводов.

Как было описано ранее, волноводы неполного травления способны уменьшить уровень оптических потерь. Соответственно были рассмотрены варианты X- и Y-делителей с использованием структур с неполным травлением в расчете на уменьшение потерь. Кроме того, больший размер моды в таких структурах по сравнению с канальным вариантом позволял рассчитывать на уменьшение влияния технологического разброса на оптические параметры. Как упоминалось, rib-волноводы целесообразно использовать только на относительно прямолинейных участках, поэтому геометрия была спроектирована и изготовлена с учетом этих ограничений (рис. 5, *a*, *b*, *d*, *e*).

1.4.1. Y-делитель

Для Y-делителя в канальной геометрии основными параметрами, влияющими на уровень оптических потерь, являются угол расхождения θ и длина отводящих волноводов L, поэтому было проведено аналогичное моделирование для Y-делителя гребенчатой геометрии. В результате получены зависимости коэффициента прохождения света через Y-делитель от угла расхождения и от длины отводящих волноводов, приведенные на рис. 6.

Из зависимости на рис. 6, *a* можно увидеть, что коэффициент прохождения света в делителе в среднем слабо зависит от угла расхождения волноводов. Полученный результат может быть связан с более

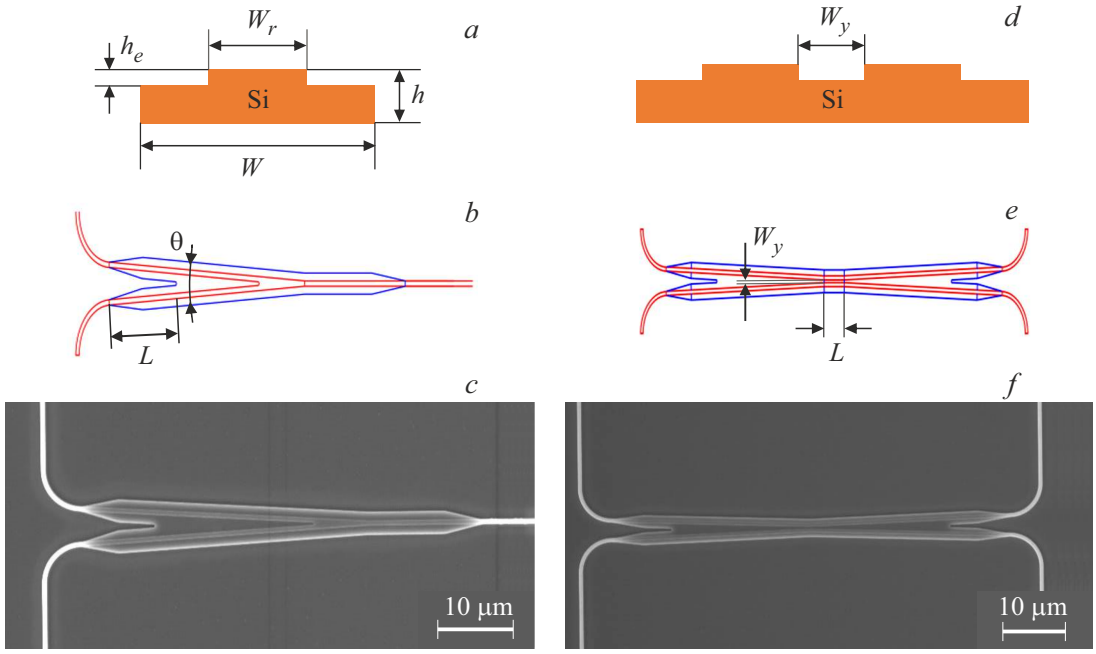


Рис. 5. Профили и схематическое изображение Y-делителя (a, b) и X-разветвителя (d, e) с гребенчатой геометрией. РЭМ-изображения (c, f) соответствующих оптических элементов. W_r — ширина гребня, W_Y — ширина зазора между двумя гребнями, h — высота волноводов, h_e — глубина травления.

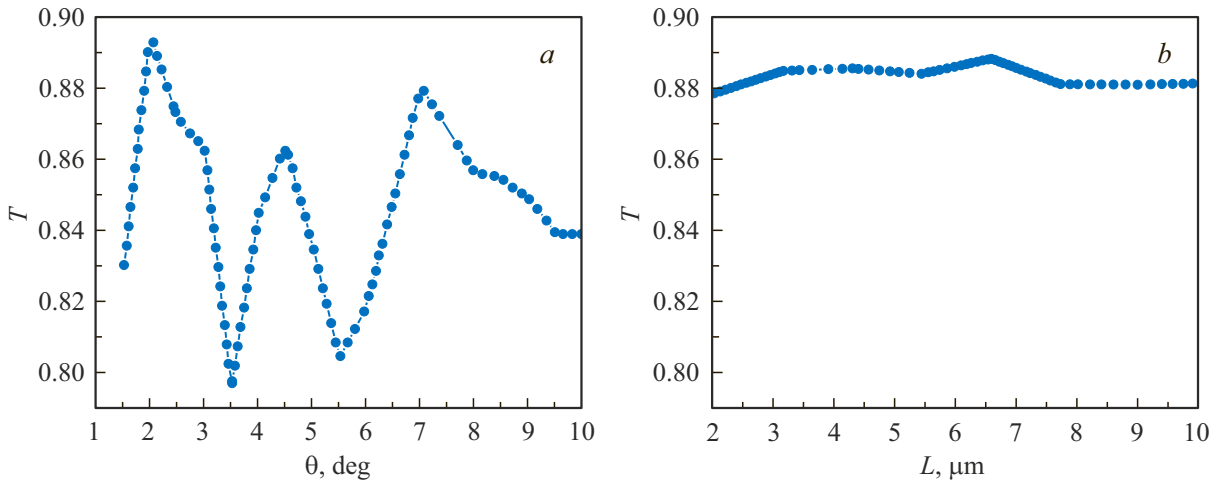


Рис. 6. Зависимость коэффициента прохождения света через Y-делитель на основе rib-волноводов от: a — угла расхождения при длине отводящих контактов 5 μm, b — длины отводящих волноводов при угле расхождения 2 °.

сильной связью мод в расходящихся rib-волноводах по сравнению с делителями на основе канальных волноводов. Следовательно, изменение структуры моды при делении излучения происходит медленнее в гребенчатых разветвителях. Это приводит к меньшему влиянию изменения угла расхождения. Тем не менее небольшое отражение от всей области расхождения волноводов приводит к возникновению слабой стоячей волны, что, в свою очередь, обусловливает наличие периодических изменений коэффициента прохождения при варьировании угла расхождения. Также из представленной зависимости можно видеть, что наименьшие потери при прохождении излучения через Y-делитель наблюдаются при угле расхождения волноводов $\theta = 2\,°$.

Из рис. 6, b видно, что изменение длины отводящих волноводов практически не изменяет коэффициент прохождения через Y-делитель. В качестве примера на рис. 7 представлено распределение амплитуды напряженности электрического поля в Y-делителе при угле расхождения $\theta = 2\,°$ и длине отводящих волноводов 5 μm.

В результате моделирования делителей на основе rib-волноводов был определен оптимальный угол рас-

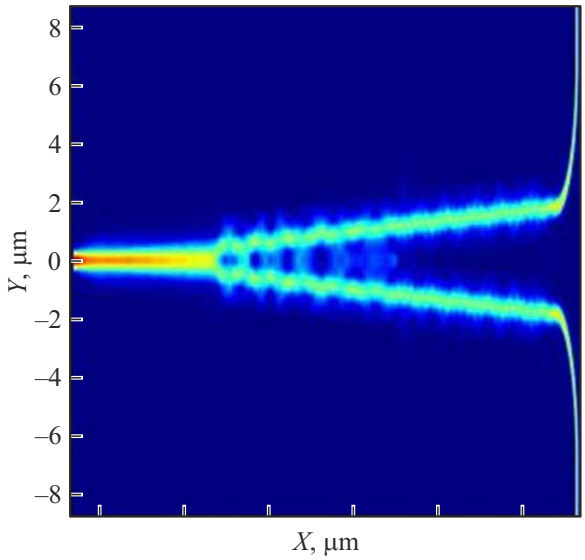


Рис. 7. Распределение амплитуды напряженности электрического поля в Y-делителе при угле расхождения $\theta = 2^\circ$ и длине отводящих волноводов $5\,\mu$m.

хождения и доказано отсутствие сильного влияния коэффициента прохождения от длины отводящих волноводов.

1.4.2. X-ответвитель

Для X-ответвителя одними из основных параметров, изменяющими коэффициент деления, являются: расстояние между гребнями волноводов W_Y и длина области перекрытия L. На рис. 8, *c* приведена расчетная зависимость коэффициента прохождения T_{11}, определяемого как $T_{11} = P_{11}/(P_{11} + P_{12})$, где P_{11} — мощность, приходящая в выход 1 при запитке через вход 1, а P_{12} — мощность, приходящая в выход 2 при запитке через вход 1, от ширины зазора W_Y. Очевидно, T_{12}, который можно аналогично определить как $T_{12} = P_{12}/(P_{11} + P_{12})$, связан с T_{11} как $T_{11} + T_{12} = 1$, и поэтому в дальнейшем не приводится. Следует отметить, что в таком виде коэффициенты T_{11} определяют именно равномерность деления, не учитывая потери, симметричные для обоих выходов. При изменении ширины зазора W_Y от 365 до 405 nm коэффициент деления меняется от 4 % до 55 % (рис. 8, *c*), т. е. ответвитель на гребенчатых волноводах менее чувствителен к технологическим ошибкам по сравнению с канальными структурами.

Также был получен суммарный коэффициент прохождения сигнала T_{full} в X-делителе при разной ширине щели W_Y, приведенный на рис. 8, *b*, из которого видно, что расчетные вносимые потери составляют 1 %–2 %, что открывает возможности оптимизации технологии для достижения этих показателей.

Наиболее чувствителен показатель T_{11} к ширине самих гребней. На рис. 8, *a* приведена его зависимость от ширины гребней W_r при фиксированном расстоянии между гребнями 350 nm и фиксированной длине области перекрытия $2\,\mu$m.

В качестве примера на рис. 9 представлено распределение амплитуды напряженности электрического поля в X-ответвителе при угле расхождения $\theta = 2^\circ$ и длине отводящих волноводов $5\,\mu$m.

Применение гребенчатых волноводов потенциально должно позволить уменьшить потери оптической системы по двум основным причинам. В рамках технологического процесса 350 nm коэффициент прохождения излучения делителей на основе rib-волноводов оказывается менее чувствителен к технологическим несовершенствам топологического рисунка. Кроме этого, использование ответвителей с гребенчатой структурой уменьшает оптические потери вследствие сокращения количества соединений между прямоугольными и rib-волноводами [18,19].

1.5. Дифракционные решетки

Для работы с оптическим сигналом необходимо обеспечить ввод излучения в волноводы ФИС с минимальными потерями. Согласование планарного волновода и оптического волокна возможно с применением различных методов, таких как стыковка в торец, использование призменных или решеточных элементов связи. Основная проблема наиболее распространенного метода торцевого ввода — необходимость изготовления обратного конуса (сужающегося волновода) с толщиной острия меньше 100 nm. Создание такого элемента в рамках технологических норм 350 nm является невозможным, поэтому в качестве основного варианта рассматривался вариант с дифракционными решетками и вертикальным вводом.

При использовании дифракционных решеток для ввода излучения в волновод, ее параметры, а также угол падения излучения подбираются таким образом, чтобы первый порядок дифракции попадал в моду волновода.

Дифракционные решетки полного травления ($e = d_{\mathrm{Si}}$) (рис. 10, *a*) с постоянным периодом наиболее простые с точки зрения изготовления. Основная проблема, присущая им, заключается в высоких вносимых потерях, связанных с прохождением значительной части излучения в подложку, а также с сильным обратным отражением, возникающим в результате большой разности эффективного показателя преломления между протравленными и нетравленными областями решетки. Указанные проблемы заметно уменьшаются в решетке неполного травления, когда $e < d_{\mathrm{Si}}$ (рис. 10, *a*). Вариации эффективного показателя преломления в решетках неполного травления значительно меньше.

Было проведено моделирование двух видов дифракционных решеток в 2*D*-режиме, при этом использовался пучок оптического излучения с гауссовым профилем, ширина которого определялась диаметром моды стандартного кварцевого волокна SMF-28 на длине волны $1.55\,\mu$m и составляла $10\,\mu$m (рис. 10, *c*, *d*).

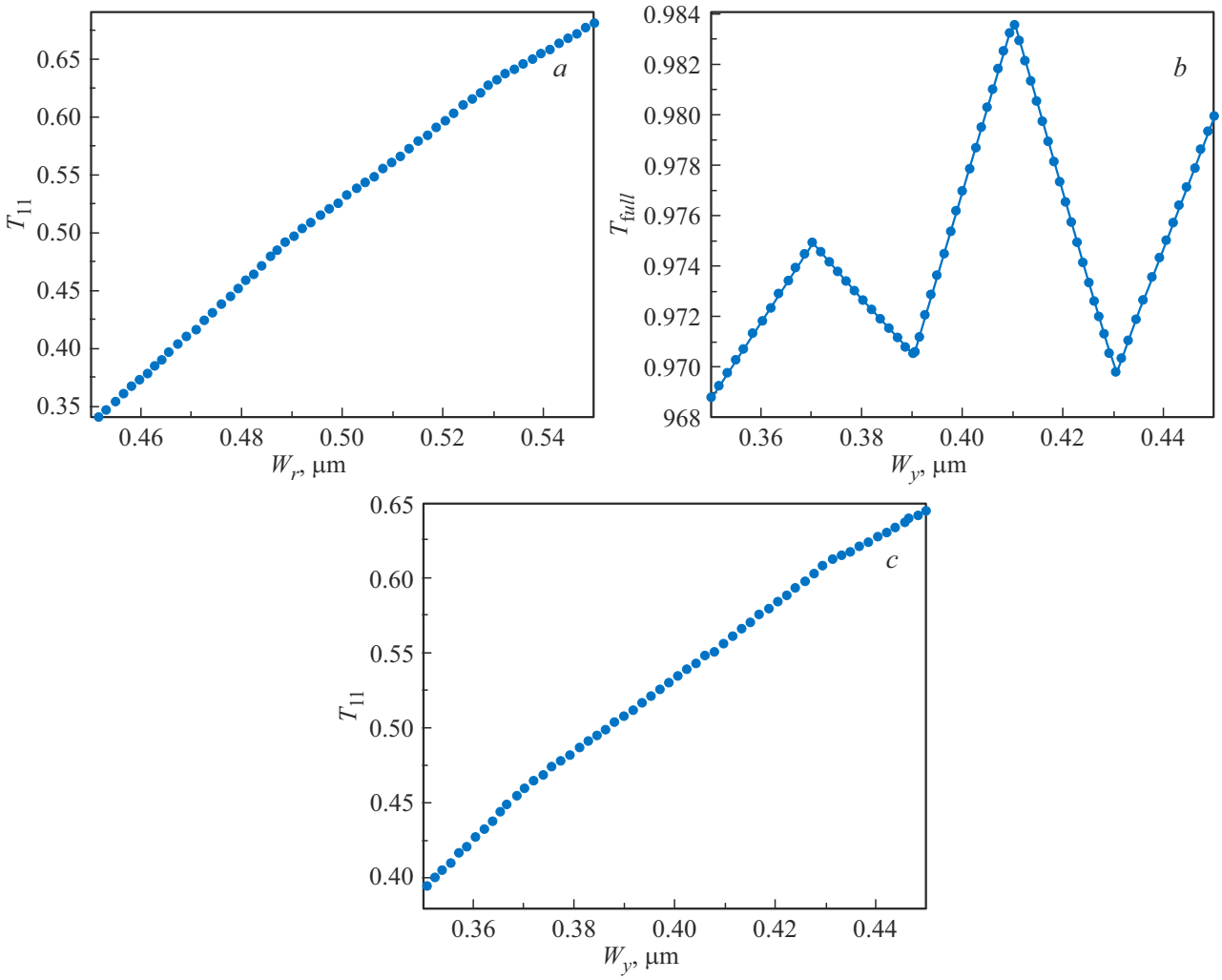


Рис. 8. Зависимость коэффициента прохождения от ширины гребня в X-делителе при длине области перекрытия $2\,\mu$m (a), суммарного коэффициента прохождения от ширины зазора между гребнями в X-делителе (b) и коэффициента прохождения от ширины зазора между гребнями в X-делителе (c).

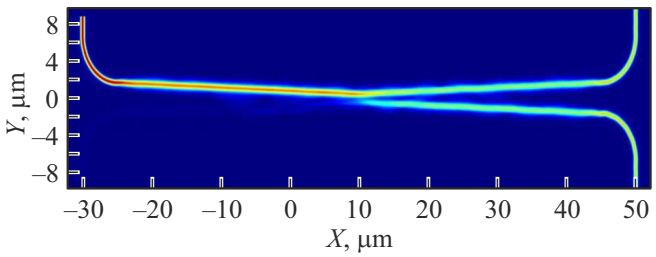


Рис. 9. Распределение амплитуды напряженности электрического поля в X-ответвителе при угле расхождения $\theta = 2^\circ$ и длине отводящих волноводов $5\,\mu$m.

Полное травление приводит к тому, что, в силу высокой разности показателя преломления между протравленной и нетравленной частями дифракционной решетки, значительная доля света отражается назад, либо просвечивает сквозь решетку, уходя в подложку, как представлено на рис. 10, c. Результаты моделирования дифракционной решетки неполного травления, представленные на рис. 10, d, показывают почти полное отсутствие прохождения излучения сквозь решетку вниз и меньшее отражение по сравнению с дифракционной решеткой полного травления. Таким образом, качественно показано, что переход к дифракционным решеткам неполного травления становится выигрышным в части минимизации оптических потерь.

1.6. Термооптический элемент

Оптическая схема ИМЦ с термооптическим фазовращателем представлена на рис. 11, a. Прямолинейные отрезки одномодовых оптических волноводов выполняют функцию ввода и вывода оптического излучения. Входной интегрально-оптический разветвитель делит оптическое излучение на два плеча. Выходной разветвитель обеспечивает интерференцию распространяющихся

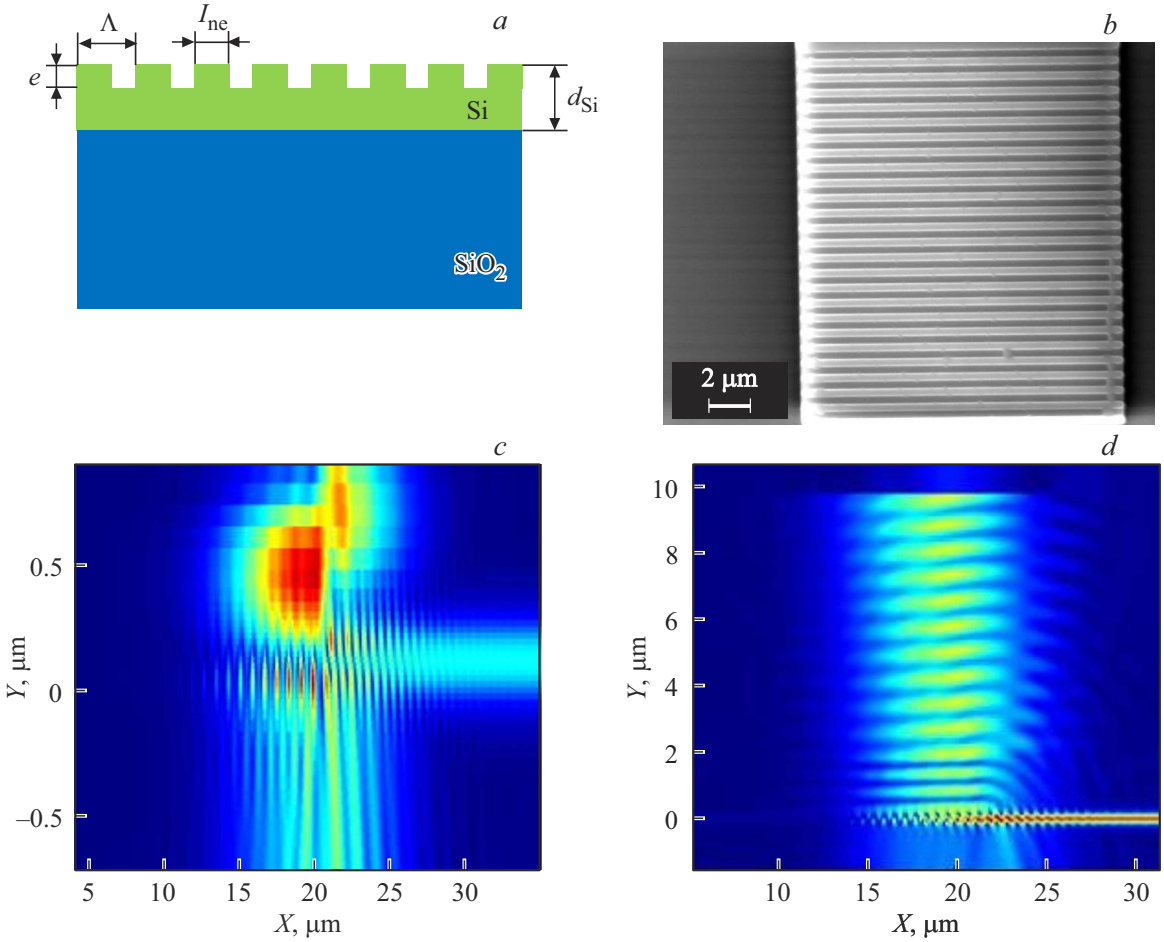


Рис. 10. Схематическое изображение дифракционной решетки в поперечном сечении (*a*). РЭМ-изображение дифракционной решетки неполного травления (*b*). Распределение электрического поля при вводе излучения в волновод через дифракционную решетку полного травления (*c*) и неполного травления (*d*).

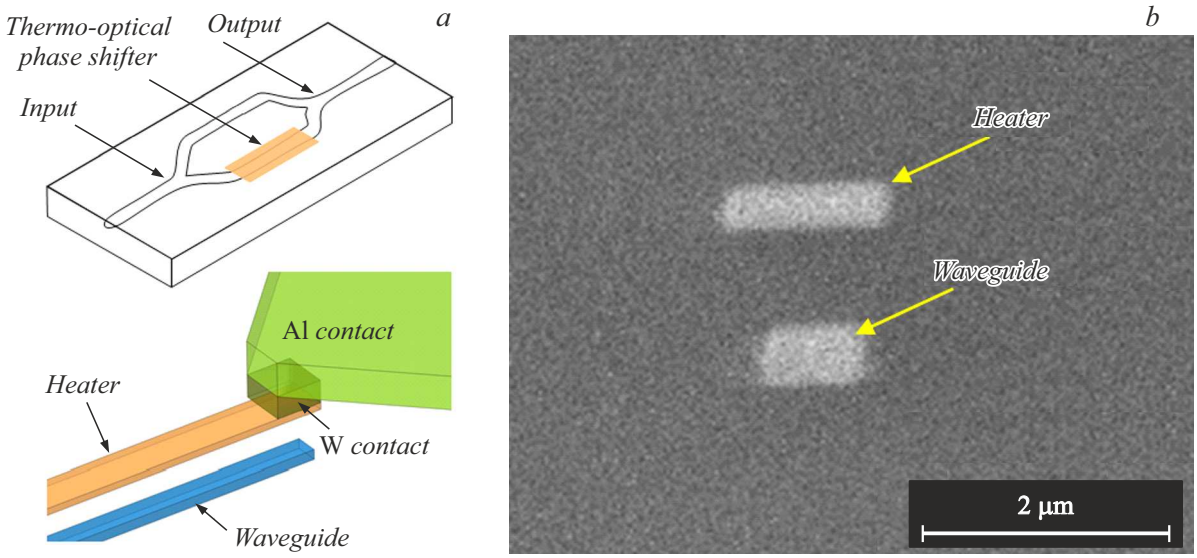


Рис. 11. *a* — схема ИМЦ, *b* – РЭМ-изображение в поперечной геометрии ФИС.

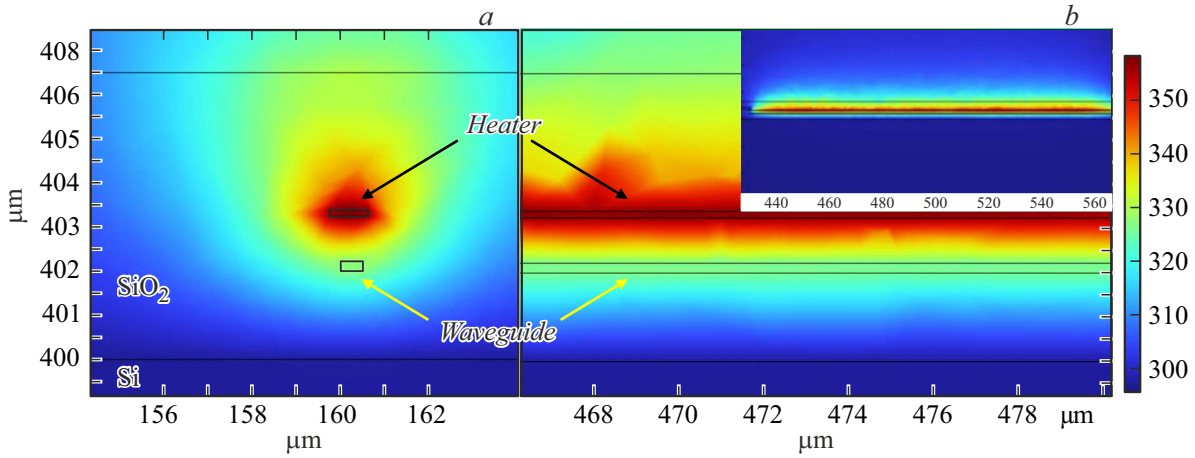


Рис. 12. Распределение теплового поля в структуре при подаче напряжения 5 V. На вставке полный размер нагревателя с волноводом в продольном направлении.

в плечах интерферометра оптических мод. Модуляция света осуществляется путем управления фазовым сдвигом между когерентно складываемыми волнами. Такой эффект достигается за счет изменения показателя преломления среды в одном из плеч интерферометра. Таким образом, интенсивность излучения на выходе из указанной планарной оптической системы зависит от разности фаз между когерентными волнами в точке их взаимной интерференции: а) открытое состояние — волновые фронты лазерного излучения приходят в точку их слияния в фазе, и на выходе из интерферометра регистрируется максимум интенсивности; б) закрытое состояние — волновые фронты лазерного излучения приходят в точку их слияния в противофазе, и на выходе из интерферометра регистрируется минимум интенсивности [20].

Благодаря сильной зависимости оптических свойств кремния от температуры возможно изменять его показатель преломления путем локального нагрева, вследствие чего изменяется эффективная оптическая длина нагретого волновода, что, в свою очередь, приводит к сдвигу фазы [21,22]. В рамках ФИС это реализуется с помощью добавления так называемого „нагревательного элемента“ над одним из плеч интерферометра.

При подаче на контактные площадки нагревательного элемента постоянного напряжения, происходит локальный нагрев одного плеча ИМЦ. При расчетах величина напряжения варьировалась в диапазоне от 0 до 10 V. Расчетное распределение теплового поля вдоль и поперек фазовращателя при напряжении 5 V приведено на рис. 12.

Используя выражения для расчета разности фаз излучения [23], а также полученные при моделировании значения температур можно теоретически оценить зависимость выходной интенсивности интерферометра от подаваемого напряжения. Было установлено, что сдвиг фазы на может быть реализован при напряжениях, не превышающих 5 V, и длине нагревательного элемента 140 μm, что говорит о возможности управления термооптическим фазовращателем с использованием малых напряжений.

2. Исследование оптических характеристик волноводных элементов ФИС

После моделирования отдельных оптических элементов была изготовлена кремниевая ФИС для экспериментального изучения ее характеристик.

Исследования по определению уровня оптических потерь в волноводах различной поперечной геометрии показали, что средние значения потерь для канальных волноводов составили (11.4 ± 0.2) dB/cm, для гребенчатых — (5.5 ± 0.2) dB/cm [24]. Достигнутый уровень потерь в гребенчатых волноводах находится на хорошем современном уровне, что обосновывает целесообразность использования подобных волноводных элементов для построения разветвленных ФИС с повышенной протяженностью.

Как говорилось выше, использование канальных волноводов на непрямолинейных участках ФИС является безальтернативным для минимизации оптических потерь при прохождении изгибов с малым радиусом закруглений. Следует отметить, что наличие большого количества переходов между канальными и гребенчатыми волноводами также увеличивает оптические потери. Минимизировать количество таких переходов можно за счет использования делителей на основе rib-волноводов.

По результатам проведенных исследований было установлено, что потери, вносимые Y-делителем на гребенчатых волноводах, оказались на уровне 1 dB, что существенно ниже потерь, вносимых Y-делителем на канальных волноводах 2–4 dB [25]. Таким образом, применение гребенчатой геометрии для создания оптических делителей

представляется целесообразным для экономии бюджета оптических потерь в фотонных интегральных схемах.

В случае канальных X-делителей наблюдался значительный разброс коэффициента деления мощности от чипа к чипу и от делителя к делителю на одном чипе. Однако при переходе к гребенчатой структуре отклонение коэффициента ответвления от номинального значения 50 % от чипа к чипу не превышало ± 10 %, что позволяет говорить о важности создания X-делителей на гребенчатых волноводах.

2.1. Дифракционные решетки

Ранее была выявлена низкая эффективность ввода/вывода излучения в ФИС с помощью дифракционных решеток полного травления с постоянным периодом [26]. Она составляла лишь 5 %, что приводило к общим потерям на стыковке ФИС и оптических волокон на уровне 25 dB. При проведении измерений на каждом чипе был сформирован набор волноводов длиной 100 μm с разными дифракционными решетками. Протяженность волноводов была выбрана предельно короткой с целью минимизации вносимых ими оптических потерь.

В таблице приведены результаты измерений эффективности ввода/вывода излучения через различные дифракционные решетки с усреднением по трем чипам ФИС.

Решетки неполного травления демонстрируют эффективность ввода излучения, близкую к 30 %, что позволяет повысить общую энергетическую эффективность системы на 10–15 dB.

Отметим, что проблеме эффективного ввода излучения в кремниевые ФИС посвящено большое количество работ, в которых достигнуты заметно более высокие значения эффективности ввода. В работах [27–31] аналогичная эффективность продемонстрирована при решеточном вводе. Как было сказано ранее, в случае торцевого ввода для получения высокой эффективности требуется создание элементов с латеральными размерами менее 100 nm и дополнительными преобразователями модового пятна. Аналогично для решеточного ввода высокая эффективность достигается на дифракционных решетках с дизайном повышенной сложности. Известны такие варианты дифракционных решеток с аподизацией, с косым травлением штрихов, с многоступенчатым травлением. Изготовление подобных конструкций как для торцевого ввода, так и для решеточного сопряжено с серьезными технологическими проблемами и не может быть осуществлено в рамках относительно простого технологического процесса с нормами 350 nm. В частности, они требуют применения электронной многоступенчатой литографии и в ряде конструкций нанесение дополнительных слоев. В нашем случае эффективность на уровне 30 % достигается на дифракционных решетках, полученных только с помощью фотолитографии в рамках используемого в работе КМОП КНИ процесса с разрешением 350 nm. Достигнутый показатель близок к рассчитанному теоретическому пределу для примененной топологии.

Результаты измерений характеристик дифракционных решеток

Решетка	Общие потери, dB	Потери на одну решетку, dB	Эффективность ввода излучения на одну решетку, %
Полного травления с канальным волноводом	-25.6 ± 0.8	-12.8 ± 0.4	5.3 ± 0.5
Полного травления с гребенчатым волноводом	-24.7 ± 1.3	-12.4 ± 0.6	5.9 ± 0.9
Неполного травления с гребенчатым волноводом	-11.4 ± 0.3	-5.7 ± 0.2	26.9 ± 1.0

2.2. Термооптический элемент

Было проведено исследование выходной интенсивности интерферометра на экспериментальном макете ФИС с геометрией волновода и нагревателя, приведенной на рис. 12. Теоретическая и экспериментальная зависимости выходной интенсивности от напряжения представлены на рис. 13, *a*.

Из анализа зависимостей на рисунке определено, что сдвиг фазы в реальной структуре отличается от расчетного сдвига фазы, что, вероятно, связано с меньшим нагревом реального „горячего“ волновода относительно модельного представления. Это в свою очередь позволяет сделать вывод о том, что в математической модели крайне важно учесть факторы, влияющие на поведение нагревательного элемента, такие, как наличие паразитного сопротивления на контактах, потенциального барьера на границе TiN/W, примесей в TiN-нагревателе. Кроме того, для повышения прогностической ценности модель должна пройти калибровку по результатам эксперимента.

Использованный в настоящей работе подход, включающий построение модели, введение геометрии и параметров работы интерферометра позволяет получать представление о влиянии температуры на величину сдвига фаз. Таким образом, становится возможным построение зависимости выходной интенсивности оптического сигнала от напряжения, поданного на нагреватель.

Использование калибровочного коэффициента, равного 1.75, для корректировки расчетных значений температуры по формуле $T_0 + (T - T_0)/1,75$, где T_0 — начальная температура волновода, T — расчетная тем-

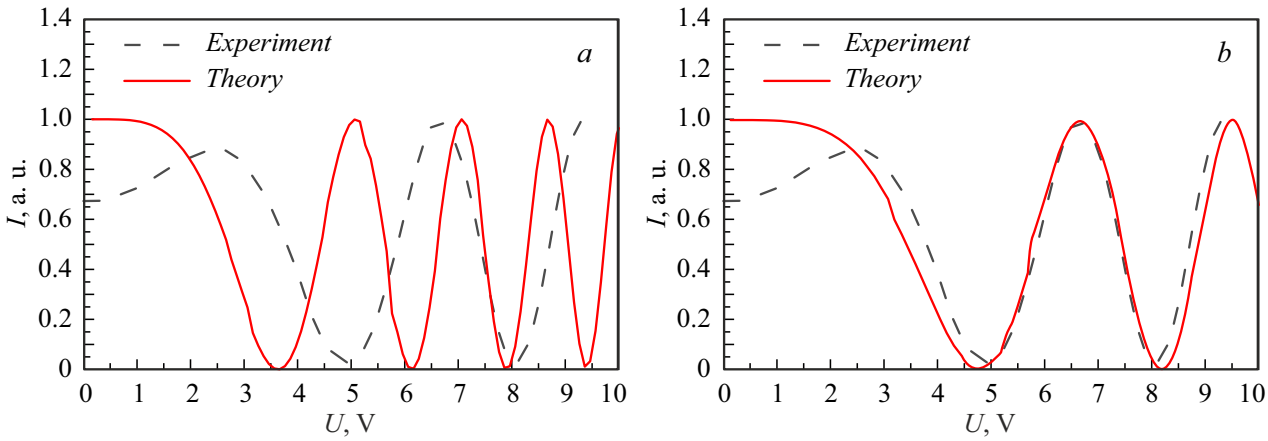


Рис. 13. Теоретическая и экспериментальная зависимости выходной интенсивности от напряжения: *a* — до введения калибровочного коэффициента, *b* — после проведения калибровки расчетной температуры с калибровочным коэффициентом 1.75

пература волновода, приводит к хорошему согласию теоретических и экспериментальных данных, представленных на рис. 13, *b*. Ввиду различия в передаче тепла от нагревателя к волноводу для макетов ФИС различной конфигурации, калибровочный коэффициент необходимо подбирать индивидуально для каждой геометрии.

Расхождение теоретической и экспериментальной кривых при малых управляющих напряжениях, предположительно объясняется наличием паразитного сопротивления на контактах планарных электрических схем.

3. Апробация волноводных элементов ФИС с оптимизированной топологией

Разработанные в настоящей работе планарные оптические элементы были использованы в конструкции аналогового фотонного вычислительного устройства для формирования диаграммы направленности фазированной антенной решетки. В основе указанного прибора была использована фотонная интегральная схема, представляющая собой систему Y-сумматоров. Условия интерференции в ней динамически задавались посредством термооптических элементов. При этом посредством ФИС осуществлялось когерентное сложение радиосигналов на оптической несущей. А с помощью термооптики задавались фазовые сдвиги, необходимые для построения диаграммы направленности ФАР.

Заключение

В кремниевой фотонике существует возможность создания быстродействующих оптических схем, работающих на частотах вплоть до субтерагерцовых [32]. Для реализации таких устройств могут потребоваться технологические процессы с минимальными топологическими размерами 90 nm и ниже [33]. Однако в погоне за минимальными размерами и высокими частотами не нужно забывать, что многие утилитарные применения ФИС их не требуют. При этом существующие технологические линейки могут справиться с задачей создания кремниевых фотонных интегральных схем, пригодных для применения в широкой номенклатуре функциональных изделий. Такой подход подразумевает концентрацию фокуса при разработке оптических интегральных устройств на решении прикладных задач в части минимизации оптических потерь за счет средств, доступных промышленным предприятиям.

В работе успешно продемонстрирован подход, объединяющий математический расчет, технологический процесс изготовления и измерения характеристик фотонных интегральных схем в рамках единого комплексного эксперимента. Результатом исследования является набор математических моделей, характеризующийся высокой прогностической ценностью.

Финансирование работы

В части математического моделирования работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2025-0008. В части эксперимента исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 „Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Shen, N. Harris, S. Skirlo, M. Prabhu, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, X. Sun, S. Zhao, H. Larochelle, D. Englund, M. Soljačić. Nat. Photon, **11**, 441 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2017.93

[2] N.C. Harris, J. Carolan, D. Bunandar, M. Prabhu, M. Hochberg, T. Baehr-Jones, M.L. Fanto, A.M. Smith, C.C. Tison, P.M. Alsing, D. Englund. Optica, **5** (12), 1623 (2018). DOI: 10.1364/OPTICA.5.001623

[3] P. Martínez-Carrasco Romero, J. Roberto Rausell-Campo, D. Pérez-Galacho, X. Li, T. Qing, T. Wang, D. Pérez-López. IEEE J. Selected Topics In Quantum Electron., **29** (6), 6101112 (2023). DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3264434

[4] R. Yao, W. Pan, Y. Cheng, C. Ji. Opt. Express, **32** (24), 42993 (2024). DOI: 10.1364/OE.536777

[5] F. Xie, H. Li, A. Xue, M. Han, L. Zhang, E. Li. Appl. Opt., **63** (30), 7935 (2024). DOI: 10.1364/AO.537503

[6] F. Valdez, V. Mere, S. Mookherjea. Optica, **10** (5), 578 (2023). DOI: 10.1364/OPTICA.484549

[7] X. Wang, C. Shang, A. Pan, X. Cheng, T. Gui, S. Yuan, C. Gui, K. Zheng, P. Zhang, X. Song, Y. Li, L. Li, C. Zeng, J. Xia. APL Photon., **7**, 076101 (2022). DOI: 10.1063/5.0097296

[8] Y. Maeda, H. Nishi, N.-P. Diamantopoulos, T. Fujii, T. Aihara, S. Yamaoka. IEEE JoLT, **42** (11), 4023 (2024). DOI: 10.1109/JLT.2024.3366579

[9] Y. Ueda, Y. Ogiso, N. Kikuchi. Proc. SPIE, **10129**, *Optical Metro Networks and Short-Haul Systems IX, 1012905* (28 January 2017), DOI: 10.1117/12.2253492

[10] T. Hiraki, T. Aihara, T. Fujii, K. Takeda, Y. Maeda, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, S. Matsuo. Optics Express, **29** (2), 2431 (2021). DOI: 10.1364/OE.411483

[11] В.Н. Трещиков. Фотон-экспресс, **3** (107), 31 (2013).

[12] Y. Xie, L. Chen, H. Li, Y. Yi. Polymers, **15** (18), 3721 (2023). DOI: 10.3390/polym15183721

[13] Z. Zhu, T.G. Brown. Opt. Express, **10** (17), 853 (2002). DOI: 10.1364/OE.10.000853

[14] Н.В. Магунов. *Лазерная термометрия твердых тел* (Физматлит, М., 2001)

[15] C.R. Doerr. Front. Phys., **3** (37) (2015). DOI: 10.3389/fphy.2015.00037

[16] N.V. Barabash, K.V. Sidorenko, A.V. Nezhdanov, A.I. Bobrov. Opt. Com., **566** (1), 130686 (2024). DOI: 10.1016/j.optcom.2024.130686

[17] Г.А. Лемешевская, А.В. Нежданов, П.В. Волков, А.И. Бобров, К.В. Сидоренко, Д.А. Семиков, О.С. Вязанкин, А.А. Скрылев, Н.В. Барабаш, А.П. Горшков. Фотон-экспресс, **6** (190), 496 (2023). DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-496-497

[18] T. Aalto, K. Solehmainen, M. Harjanne, M. Kapulainen, P. Heimala. IEEE PTL, **18** (5), 709 (2006). DOI: 10.1109/LPT.2006.871150

[19] K. Solehmainen, T. Aalto, J. Dekker, M. Kapulainen, M. Harjanne, P. Heimala. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., **8** (7), S455 (2006). DOI: 10.1088/1464-4258/8/7/S22

[20] В.М. Афанасьев. Прикладная фотоника, **3** (4), 341 (2016).

[21] А.Н. Магунов, О.В. Лукин. Микроэлектроника, **25** (2), 97 (1996).

[22] M. Jacques, A. Samani, E. El-Fiky, D. Patel, Z. Xing, D.V. Plant. Opt. Express, **27** (8), 10456 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.010456

[23] А.П. Горшков, А.В. Нежданов, П.В. Волков, Г.А. Лемешевская, К.В. Сидоренко, А.И. Бобров, А.А. Скрылев, Д.С. Клементьев. Физмат, **2** (1), 36 (2024). DOI: 10.56304/S2949609824010051

[24] А.А. Скрылев, А.В. Нежданов, А.И. Бобров, К.В. Сидоренко, П.В. Волков, О.С. Вязанкин. Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, **7**, 98 (2024).

[25] А.В. Нежданов, К.В. Сидоренко, П.В. Волков, О.С. Вязанкин, А.А. Скрылев, А.И. Бобров, Д.С. Клементьев, А.П. Горшков, Н.В. Малехонова, Г.А. Лемешевская. *Мокеровские чтения: 15-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники* (Сборник трудов, 22–23 мая 2024, Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, М., 2024), с. 25–26.

[26] Y. Wang, W. Shi, X. Wang, J. Flueckiger, H. Yun, N.A.F. Jaeger, L. Chrostowski. Proc. SPIE, 8915, Photonics North 2013, 89150U (2013). DOI: 10.1117/12.2037955

[27] Q. Fang, J. Song, X. Luo et al. Opt. Express, **19** (22), 21588 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.021588

[28] N. Hatori, T. Shimizu, M. Okano et al. J. Lightwave Technol., **32** (7), 1329 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2304305

[29] T.W. Ang, G.T. Reed, A. Vonsovici, A.G.R. Evans, P.R. Routley, M.R. Josey. Appl. Phys. Lett., **77**, 4214 (2000). DOI: 1063/1.1334910

[30] R. Marchetti, C. Lacava, A. Khokhar, X. Chen, I. Cristiani, D.J. Richardson, G.T. Reed, P. Petropoulos, P. Minzioni. Sci. Rep, **7**, 16670 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-16505-z

[31] F.M. Fan, M.A. Popović, F.X. Kärtner. Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO). Optical Society of America (2007). Paper CTuDD3. DOI: 10.1109/CLEO.2007.4452953

[32] G. Sinatkas, T. Christopoulos, O. Tsilipakos, E.E. Kriezis. J. Appl. Phys., **130** (1), 010901 (2021). DOI: 10.1063/5.0048712

[33] С.А. Степаненко. ДАН, **476** (4), 389 (2017).