

Эффективность согласования одномодового волокна с фотонной интегральной схемой Si₃N₄

© И.В. Ивашенцева, И.В. Третьяков, Н.С. Каурова, А.Д. Голиков, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет,
Москва, Россия

e-mail: irinivas22@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2024 г.

В окончательной редакции 02.10.2024 г.

Принята к публикации 22.10.2024 г.

Оптимизирована торцевая стыковка оптических волокон с волноводами фотонных интегральных схем на основе Si₃N₄. Согласованы размеры моды оптического волокна и моды волновода при торцевом вводе. Для этого использована сварка одномодового оптического волокна с волокном с высокой числовой апертурой, позволяющая уменьшить размер моды оптического волокна, а со стороны чипа разработан и изготовлен преобразователь на основе линейного торцевого инвертированного тейпера. Линейный торцевой инвертированный тейпер представляет из себя трапецевидную призму, широкой частью примыкающую к волноводу и сужающуюся по ширине до 0.3 μm к торцам кристалла фотонной интегральной схемы, высота трапеции, лежащей в основании этой призмы, составляет 300 μm. Экспериментально продемонстрирована возможность благодаря этому снизить стыковочные потери при торцевом вводе до 0.7 dB на торец.

Ключевые слова: одномодовое волокно, волокно с высокой числовой апертурой, линейный торцевой инвертированный тейпер, фотонная интегральная схема.

DOI: 10.61011/OS.2024.10.59423.7024-24

Введение

Размеры электронных интегральных схем постепенно уменьшаются и достигают своего физического предела, а потребность в высокой скорости обработки информации продолжает возрастать. Обойти этот предел можно только при использовании для обработки информации устройств, работающих на других механизмах. Одним из решений является возможность не только передавать, но и обрабатывать информацию благодаря фотонам. На этом фоне фотонные интегральные схемы (ФИС) за счет высокой скорости и малого энергопотребления начинают быть реальной перспективой для дальнейшего развития [1]. Последнее десятилетие фотоника на кремнии сильно продвинулась вперед и потенциально приблизилась к реальным применениям в области телекоммуникаций, передачи данных, медицинских технологий, безопасности, детектирования, квантового моделирования [2], машинного обучения [3] и квантовых вычислений [4]. Главная движущая сила фотоники на кремнии — возможность реализовать компактную, высоко интегрированную систему, низкую по себестоимости и с большой чувствительностью. Список уже доступных фотонных элементов включает одномерные и двумерные решеточные элементы связи, широкополосные торцевые соединители, полосковые и прямоугольные волноводы, разветвители, кольцевые резонаторы, электрооптические модуляторы и др. [5].

Современные ФИС могут обеспечивать работоспособность на длинах волн из широкого спектрального окна прозрачности - в частности, для Si₃N₄ от видимого

(~ 400 nm) до инфракрасного (ИК) (> 2.5 μm) [6]. Традиционные ФИС из оксида кремния, SiO₂, и кремния, Si, имеют сильный контраст в показателях преломления, что ведет к миниатюризации конечных устройств и, следовательно, большей сложности изготовления [7]. Поэтому в данной работе используются волноводы с сердцевиной из Si₃N₄ и оболочкой из SiO₂, имеющие меньшую разность показателей преломления, за счет чего размеры устройства увеличиваются, но при этом погрешность изготовления менее существенна. Такие материалы позволяют изготовить волноводы с потерями пропускания от 0.3 до 1.0 dB/cm в спектральном интервале от 400 до 2350 nm [8]. Наиболее широкое применение ФИС находят в оптоволоконных линиях, работающих на телекоммуникационной длине волны ИК диапазона (1550 nm), поэтому всё дальнейшее рассмотрение ведется для этой длины волны.

Главный вклад в потери пропускания вносят потери на вводе излучения из оптического волокна в ФИС и потери на согласовании волноводов с различными компонентами ФИС, таких как соединители, источники и детекторы. Наиболее существенным вкладом являются потери на ввод ИК излучения в ФИС, уменьшение которых приведет к увеличению пропускной способности, сравнимой с пропускной способностью объемных оптических технологий [9]. Диаметр сердцевины оптического одномодового волокна SMF28, являющегося основой современной телекоммуникационной связи, в несколько раз превышает ширину волновода ФИС, поэтому и диаметры полей мод (MPD) волокна и волновода, характеризующие распределение светового поля в волокне и

волноводе, существенно отличаются. Чем ближе MFD волокна к MFD волновода, тем лучше согласование мод и тем ниже потери на вводе ИК излучения. Поэтому для того, чтобы снизить потери на вводе, необходимо уменьшить MFD волокна путем либо линзирования кончика оптического волокна, либо сваривания SMF28 с волокном с большой числовой апертурой (UHNA).

Первый способ отличается высокой сложностью изготовления, ведущей к большой погрешности в значениях MFD от волокна к волокну. Второй способ является более простым с технологической точки зрения и соответственно более доступным не только для применения в научном исследовании, но и в последующей коммерциализации. Кроме уменьшения MFD внутри оптического волокна, также возможно сужение MFD непосредственно в волноводе ФИС с помощью применения специальных интегральных оптических элементов связи, а именно торцевых тейперов (трапециевидных призм), с целью достижения наиболее высокой эффективности согласования. Торцевой метод ввода ИК излучения отличается высокой эффективностью и широкополосностью согласования по сравнению с другими методами, поэтому в работе выбран именно этот метод ввода.

Данная работа посвящена снижению потерь на вводе ИК излучения из оптического волокна в ФИС благодаря применению преобразователей моды электромагнитного поля, волокон SMF28, сваренных с UHNA3, и сужающихся к торцам кристалла ФИС участков волноводов, линейных торцевых инвертированных тейперов. В разд. 1 будет подробно описана структура, процесс изготовления и потери пропускания преобразователя моды оптического волокна. В данном исследовании удалось получить средние потери на сварку SMF28 с UHNA3 менее 1 dB. Затем в разд. 2 кратко описан метод торцевого ввода и объяснен выбор линейного торцевого инвертированного тейпера, в разд. 3 описана структура ФИС и технология изготовления, в разд. 4 — технология полировки торцов ФИС с относительной дисперсией потерь пропускания 7.9%. В разд. 5 и 6 соответственно описана методика измерения потерь пропускания ФИС с волокном SMF28, сваренным с UHNA3, и выполнен анализ результатов.

1. Преобразователь моды волокна

В качестве преобразователя моды оптического волокна в этой работе сначала выступает одномодовое волокно SMF28 с линзованным кончиком, а затем SMF28, сваренное с волокном с большой апертурой. Оптическое волокно состоит из сердцевины, имеющей большой показатель преломления и отражающей оболочки с немного меньшим показателем преломления. Оптическое волокно — очень хрупкий материал, поэтому любое волокно при изготовлении помещено в защитный лак и покрытие. Благодаря эффекту полного внутреннего отражения луч, попадая с торца в сердцеви-

Таблица 1. Эффективность согласования двух линзованных волокон

Номера волокон	Потери, dB
1 и 2	6.7 ± 1.1
3 и 4	15.8 ± 0.2

ну оптического волокна с углом, большим критического, отражается от оболочки и продолжает распространяться по оптическому волокну. При математическом описании распространения электромагнитной волны в оптическом волокне луч имеет гауссов профиль. Этот профиль работает на основной моде TEM₀₀ и описывается формулой распределения интенсивности:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2D^2}{MFD^2}\right),$$

где параметр MFD — диаметр луча, на котором интенсивность света спадает в e^2 раз, I_0 — интенсивность в центре пятна при $D = 0$ [10]. Оптическое волокно SMF28 состоит из сердцевины диаметром $8.2 \mu\text{m}$, изготовленной из SiO_2 с добавлением германия, и отражающей оболочки диаметром $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$ из SiO_2 , эффективный показатель преломления 1.47. Диаметр поля моды для длины волны $1.55 \mu\text{m}$ составляет $10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$. Числовая апертура NA представляет собой отношение длины волны к диаметру сердцевины оптического волокна и равна 0.14 [11]. Диаметр поля моды оптического волокна SMF28 значительно больше площади поперечного сечения одномодового волновода [12], поэтому уменьшить диаметр поля моды оптического волокна можно либо с помощью линзирования, либо с помощью применения преобразователей моды оптического волокна.

Изначально работа по торцевому вводу излучения из оптического одномодового волокна в ФИС была начата с коммерческим линзованным волокном. Линзованное волокно изготавливали из оптического волокна SMF28 так, чтобы кончик волокна представлял собой коническую линзу. У линзованного волокна есть фокальная точка с наименьшим диаметром поля моды, в этой точке MFD был в диапазоне $2.5 - 3 \mu\text{m}$. Потери пропускания линзованного волокна представлены в табл. 1. Процесс измерения потерь пропускания двух оптических волокон аналогичен процессу измерения потерь пропускания оптического волокна и волновода ФИС и будет описан в дальнейшем в разд. 5. Исходя из приведенных данных можно выявить ярко выраженный разброс от волокна к волокну при одном и том же технологическом маршруте изготовления. Изготовление линзованного волокна имеет высокую сложность, что существенно влияет на качество оптических волокон и в свою очередь является препятствием для исследовательской деятельности, где

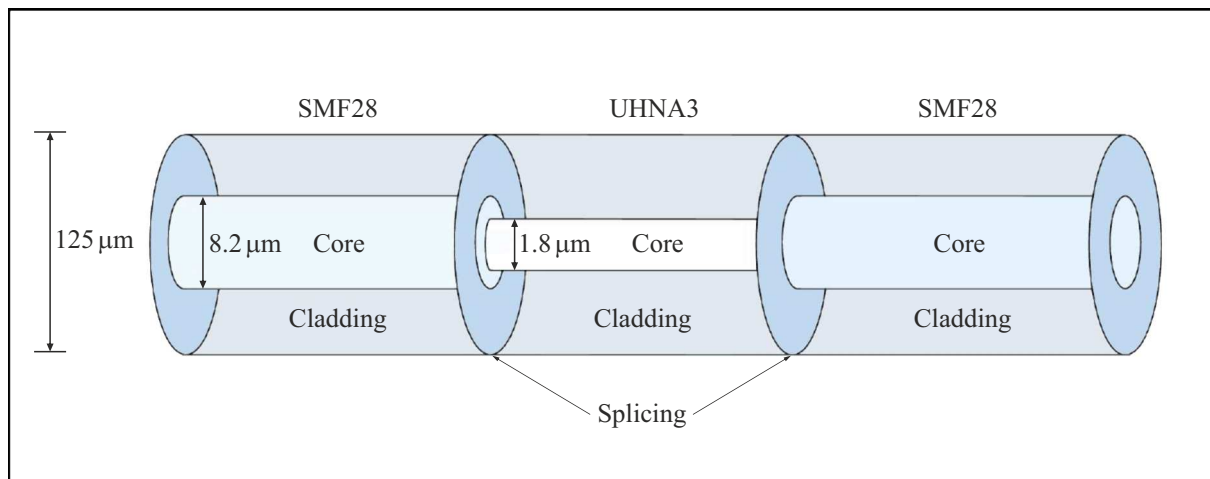


Рис. 1. Структура композитного волокна SMF28_UHNA3_SMF28.

Таблица 2. Основные параметры процесса сварки для машины Fujikura FSM-40S

Мощность разряда, W	Расстояние, μm	Перекрытие, μm	Время сварки, ms
20	15	10	18000

способ уменьшения диаметра поля моды внутри оптического волокна не является основной задачей, поэтому был применен альтернативный способ.

Это способ сварки SMF28 с UHNA, являющимся оптоволоконным преобразователем моды. Мы использовали UHNA3. Оптическое волокно UHNA3 имеет сердцевину диаметром $1.8 \mu\text{m}$, $\text{MFD} = 4.1 \pm 0.3 \mu\text{m}$ для длины волны $1.55 \mu\text{m}$, а $\text{NA} = 0.35$ [13]. Оптическое волокно UHNA3 сваривали по специальному рецепту с SMF28, оптимальные параметры процесса сварки на машине Fujikura FSM-40S [14], настроенные в текущей работе, приведены в табл. 2. Концы волокон SMF28 и UHNA3 предварительно зачищали стриппером FujikuraSS03 от защитного покрытия и лака на длину 4.7 cm , затем обрабатывали в изопропиловом спирте, чтобы убрать остатки клея от оболочки и частиц пыли. Затем при помощи High Precision Cleaver V11 оптические волокна скалывали на длину 4 cm , чтобы торцы кончиков оптических волокон были ортогональны к сердцевинам оптических волокон. Далее оптические волокна SMF28 и UHNA3 помещают в сварочный аппарат Fujikura FSM-40S. После сварки получают оптическое волокно SMF28 с кончиком UHNA3 длиной 4 cm (структура SMF28_UHNA3). После этого еще одно оптическое волокно SMF28 также зачищают стриппером, обрабатывают в изопропиловом спирте и скалывают. Это волокно SMF28 и структуру SMF28_UHNA3 помещают в сварочный аппарат. В итоге получают волокно с двумя разрезами AC/APC для под-

Таблица 3. Потери пропускания SMF28_UHNA3 и UHNA3_SMF28

Номера волокон	Потери, dB
1 и 6	0.5 ± 0.1
2 и 7	0.6 ± 0.1
3 и 8	1.8 ± 0.1
4 и 9	1.2 ± 0.2
5 и 10	0.9 ± 0.1

Таблица 4. Средние потери пропускания при согласовании двух линзованных волокон и двух SMF28, сваренных с UHNA3

Тип волокна	Потери, dB
Линзованное волокно	11.2 ± 4.2
UHNA3	1 ± 0.3

ключения к лазеру и измерителю мощности на концах и участка в середине волокна, зачищенной от защитной оболочки и клея, состоящую из волокон SMF28, UHNA3 и SMF28. Эта часть, структура SMF28_UHNA3_SMF28, представлена на рис. 1. Затем это композитное волокно раскалывали посередине UHNA3 и получали два волокна, представляющих собой SMF28, сваренное с UHNA3 (в дальнейшем SMF28_UHNA3 — волокно на вводе ИК излучения в торец тейпера волновода ФИС и UHNA3_SMF28 — волокно на выводе ИК излучения из торца тейпера волновода ФИС). Результаты измерений потерь пропускания на сварке при согласовании двух волокон SMF28_UHNA3 и SMF28_UHNA3 из торца в торец представлены в табл. 3.

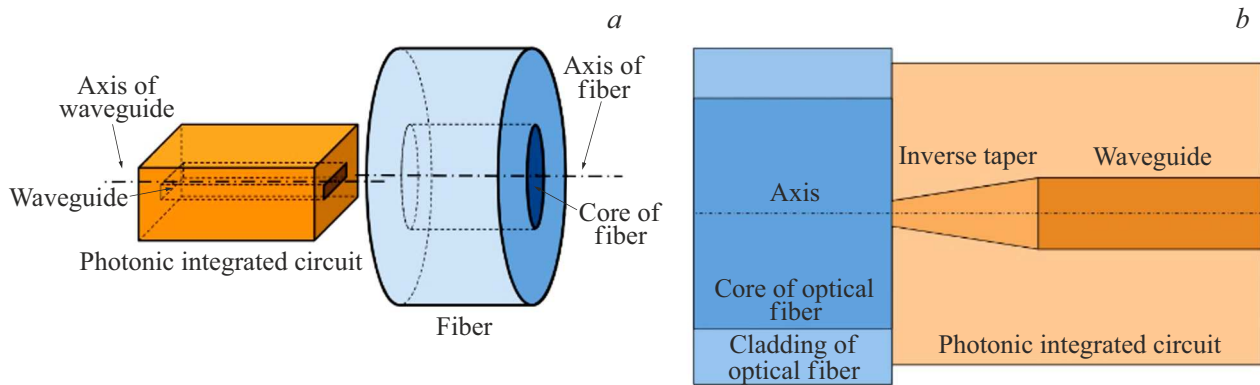


Рис. 2. Сердцевина волокна и волновод изображены не в масштабе, размеры волокна значительно превышают размеры волновода. (a) Схема торцевого ввода; (b) после юстировки кончик линейного инвертированного торцевого тейпера соосен кончику волокна UHNA3.

В табл. 4 приведены результаты измерения средних потерь пропускания для разных оптических волокон. При сравнении потерь пропускания линзованных волокон друг с другом и преобразователей моды оптического волокна между собой нетрудно заметить, что потери пропускания при согласовывании SMF28_UHNA3 и UHNA3_SMF28 и дисперсия результатов значительно ниже. Как уже было отмечено ранее, линзованное волокно имеет высокую погрешность изготовления, что ведет к большим различиям в MFD между двумя исследуемыми оптическими волокнами, из-за которых потери пропускания выше, поэтому остальная часть работы была проведена с SMF28, сваренным с UHNA3.

2. Линейный торцевой инвертированный тейпер

Уменьшить потери согласования между оптическим волокном и волноводом ФИС можно не только за счет уменьшения MFD внутри оптического волокна, но и применения специальных интегрально-оптических элементов в ФИС. Такие элементы можно отнести к двум методам соединения: согласованию с помощью решеточного элемента связи и применению торцевых тейперов. Решеточные элементы связи имеют ряд преимуществ, таких как компактность, возможность тестирования на уровне пластин, высокая точность позиционирования, но при этом имеют ряд существенных недостатков, таких как низкая эффективность согласования (обыкновенно ниже 3 dB), узкая полоса пропускания. Торцевые тейперы, напротив, отличаются высокой эффективностью согласования, широкой полосой пропускания, поляризационной независимостью, однако являются довольно крупными, имеют низкую точность позиционирования и имеют строгие требования к качеству подготовки торцов ФИС [1]. Благодаря возможности достижения сравнительно более высокой эффективности согласования с применением торцевых тейперов по сравнению с реше-

точными элементами связи выбор был сделан в пользу торцевого ввода. При согласовании оптического волокна и волновода с помощью торцевого ввода торцы оптического волокна и волновода соединяются так, чтобы их сердцевинки стали соосны, а мода волокна (диаметр сердцевинки $8.2 \mu\text{m}$) плавно могла быть преобразована в моду волновода (ширина волновода $1.3 \mu\text{m}$), схема торцевого ввода представлена на рис. 2.

Торцевые тейперы (трапециевидные призмы) играют важную роль при согласовании оптического волокна и волновода при торцевом вводе. Существует множество разных видов, отличающихся по своей форме и технологии изготовления. Инвертированный тейпер в противоположность прямому представляет собой волновод, сужающийся к торцам ФИС, а не расширяющийся. В инвертированном тейпере кончик имеет площадь малую по сравнению с модой распространения оптического волокна, $300 \times 330 \text{ nm}$, поэтому излучение, попадающее из оптического волокна, может быть захвачено тейпером только частично. Но по мере расширения тейпера мода сужается и становится близкой по размеру к волноводной, а чем ближе по размеру волноводная и суженная тейпером моды, тем меньше потери на согласовании (рис. 2, b) [15].

Инвертированные тейперы характеризуются такими параметрами, как эффективность согласования, физические размеры, высокая точность позиционирования волокна [16]. Физические размеры, от которых зависят размеры конечного устройства, определяют степень интеграции, технологическую сложность изготовления, возможность упаковки ФИС вместе с оптическим волокном в единое устройство для удобства ввода, обработки и вывода информации. Компактные размеры способствуют увеличению степени интеграции и вместе с тем уменьшают стоимость изготовления. Наиболее простые в изготовлении торцевые тейперы, состоящие из одного тейпера, отличаются высокой точностью позиционирования. Важно отметить, что в тейпере распространение излучения происходит с помощью распреде-

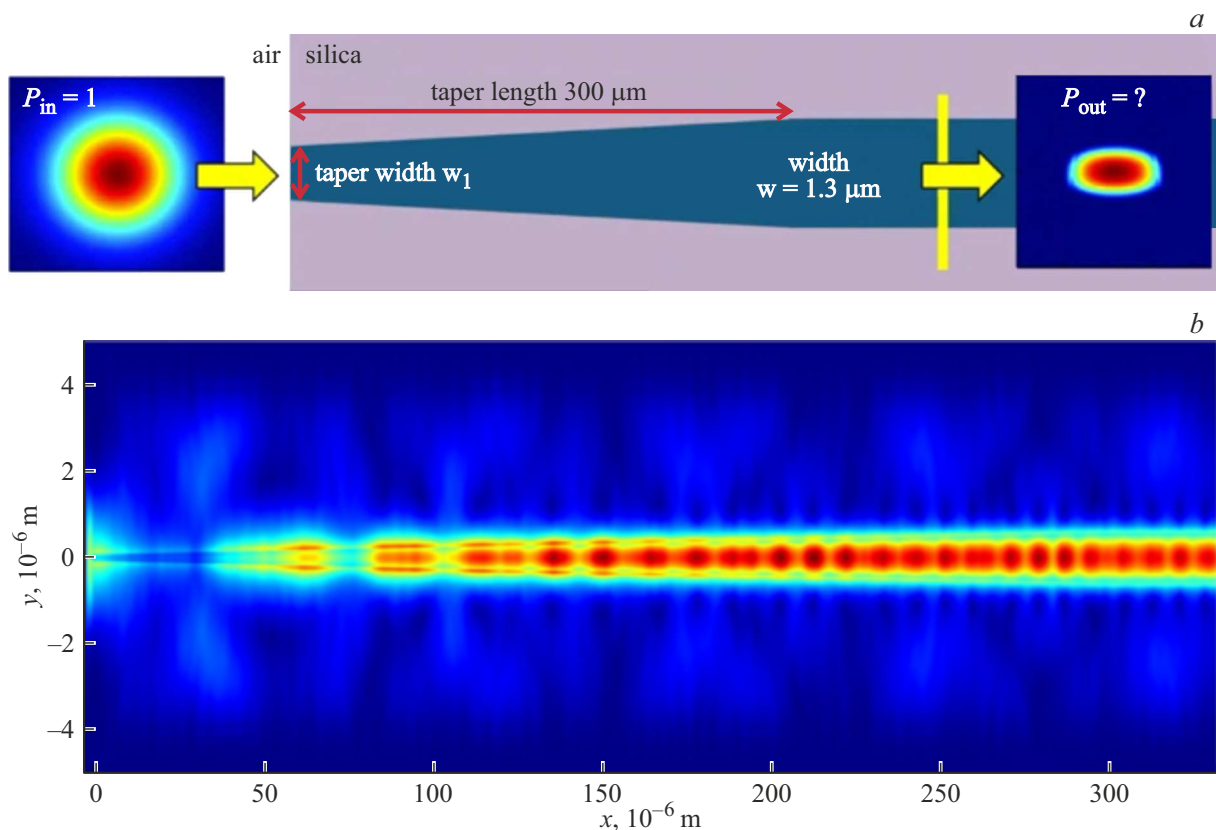


Рис. 3. (а) Профиль амплитуды электрического поля волновода на входе и выходе ИК излучения в тейпере [15]; (б) распространение моды в линейном торцевом инвертированном тейпере.

ления поперечных волн электрического и магнитного поля вдоль ширины и толщины волновода соответственно, и чтобы уменьшить зависимость от поляризации, оптические волноводы следует делать квадратными в поперечном сечении [17,18]. Также стоит добавить, что работа ведется с одномодовыми волноводами, поэтому для волновода необходим такой параметр, как адиабатичность — распространение основной моды вдоль волновода без преобразования в моды более высокого порядка и возбуждения других мод [19]. Адиабатичность тейпера может быть достигнута при увеличении длины тейпера до $300 \mu\text{m}$. На данный момент существует большое количество типов торцевых инвертированных тейперов, об основных пойдет дальнейшая речь.

Первый тип торцевых инвертированных тейперов представляет собой призму с увеличивающейся шириной от торца к волноводу. Это увеличение может происходить линейно в зависимости от длины волновода с постепенным увеличением ширины по секциям [20], параболически или экспоненциально [21]. Главное достоинство таких тейперов заключается в относительной простоте создания маски для электронной литографии и последующем изготовлении, однако такие структуры обладают довольно большим размером и имеют не самую высокую эффективность согласования — не хуже -2 dB .

Следующий тип, тейпер с несколькими кончиками, представляет собой комбинацию нескольких тейперов первого вида [22]. Излучение вводят в волновод через кончики нескольких тейперов, расположенных в один ряд, затем широкая часть этих тейперов переходит в один общий прямой тейпер. Тейпер с несколькими кончиками имеет более высокую эффективность согласования, около -1.5 dB , и меньшую необходимую точность позиционирования, но при этом более высокую сложность изготовления.

Еще один тип торцевых тейперов — тейперы с использованием дифракционной решетки — представляют из себя линейные инвертированные тейперы с переменным показателем преломления в направлении распространения излучения [23]. Такие тейперы обладают строгой адиабатичностью в сравнении с предыдущими типами, более компактные (не более $40 \mu\text{m}$), полоса пропускания около 100 nm вблизи длины волны 1550 nm . Отличаются высокой эффективностью согласования, -0.75 dB . Их изготавливают с помощью электронной литографии, однако процесс изготовления занимает значительно большее время и требует технологически большее количество инструментов в сравнении с предыдущими тейперами.

Существуют другие типы, такие как торцевые тейперы с несколькими вспомогательными волноводами свер-

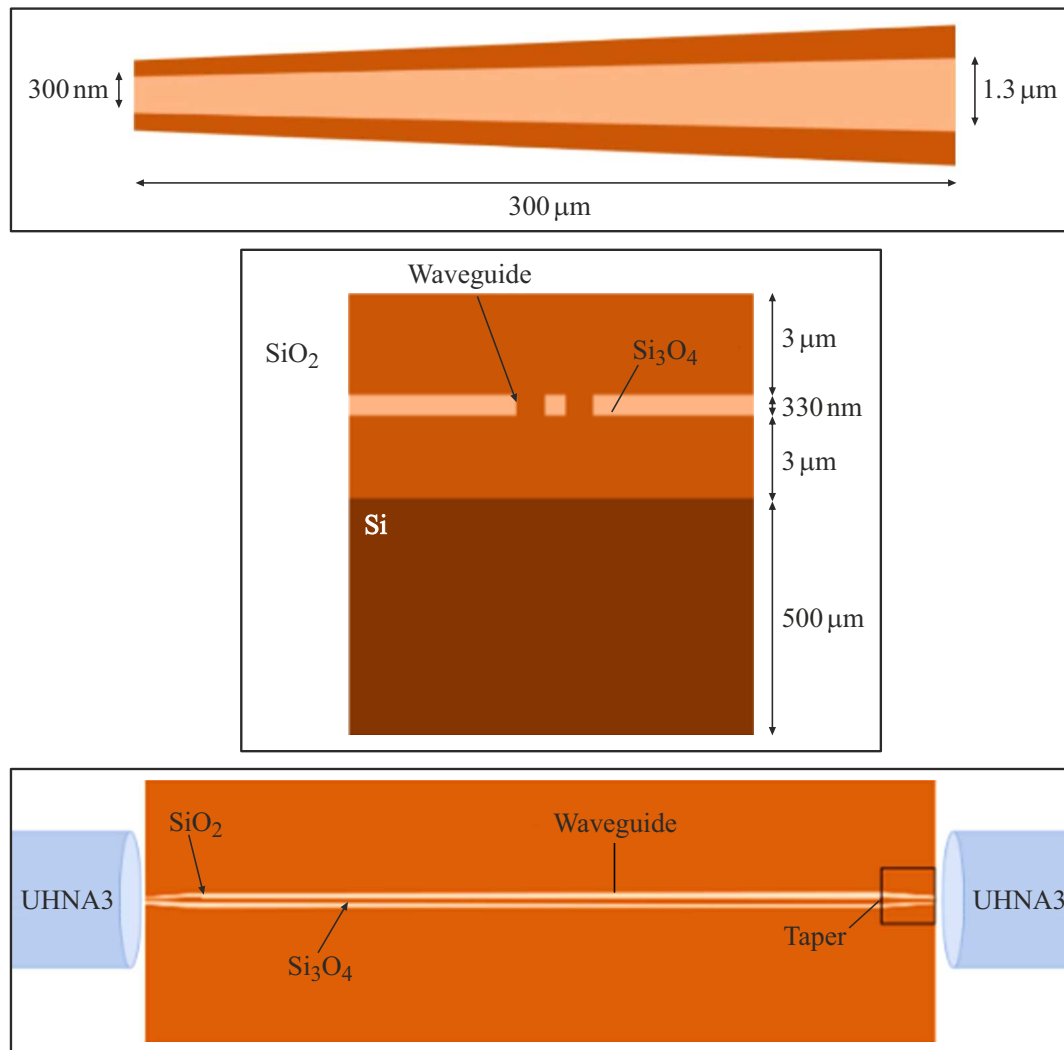


Рис. 4. (a) Размеры линейного торцевого инвертированного тейпера; (b) торец ФИС; (c) часть структуры с одним волноводом ФИС и оптическими волокнами, в каждой структуре по 9 идентичных параллельных волноводов.

ху [24], многослойные торцевые тейперы — каскадные тейперы с постепенным уменьшением показателя преломления от верхнего тейпера к нижнему [25], торцевые тейперы в оболочке с более низким показателем преломления [26], торцевые тейперы с меняющимися толщиной и шириной в направлении распространения излучения [27], торцевые тейперы с кантилевером [28]. Эффективность согласования всех этих структур не хуже 1 dB, однако так или иначе процесс производства требует чрезвычайно большого количества шагов, что затруднительно для текущего состояния имеющейся технологии, а также препятствует дальнейшей коммерциализации [1].

Данная работа нацелена на апробирование возможностей имеющейся технологии электронной литографии с помощью расчета средних потерь пропускания на 1 mm, поэтому выбран наиболее простой в изготовлении линейный торцевой инвертированный тейпер.

3. Структура ФИС и технология изготовления

Первый шаг на пути к изготовлению волноводов с линейными торцевыми инвертированными тейперами — моделирование в среде Ansys Lumerical (рис. 3). Процедура моделирования состоит из определения геометрических размеров структуры (волновод, подложка и покрывной слой) и их материалов. Очень важно правильно подобрать правильную площадь поперечного сечения, так как слишком узкий волновод может не пропускать фундаментальную моду, а слишком широкий может захватывать моды более высокого порядка. Далее нужно назначить область моделирования: разбиение области моделирования на сегменты и граничные условия (рассматривается только поперечная электрическая мода). Затем определяется направление распространения источника излучения, имеющего форму гауссова пучка

с $MFD = 3.2 - 4.8 \mu\text{m}$ и длиной волны $1.55 \mu\text{m}$. После этого назначаются Monitor Frequency-domain field and power (вдоль оси распространения излучения), чтобы промоделировать распространение излучения в тейпере и волноводе, и Monitor Frequency-domain field and power, чтобы промоделировать профиль MFD на выходе из тейпера, Monitor Mode expansion. Затем итерационно меняют геометрические параметры линейного торцевого инвертированного тейпера и волновода, чтобы вычислить максимально возможную теоретическую эффективность согласования. Теоретическая эффективность согласования была найдена и равна -0.97 dB , геометрические параметры линейного торцевого инвертированного тейпера и волновода изображены на рис. 4.

Дальше работали с библиотекой GDShelpers для создания файлов шаблонов для литографии на языке программирования Python3. В этой среде подготовили маску для электронной литографии для образцов №1 и №2 с массивами из 9 волноводов с одинаковыми геометрическими параметрами длиной 5 и 7 mm соответственно. Образцы структур изготавливали из трехслойной подложки $\text{Si } 500 \mu\text{m} / \text{SiO}_2 \text{ } 2.6 \mu\text{m} / \text{Si}_3\text{N}_4 \text{ } 0.33 \mu\text{m}$. На электронной литографии в позитивном резисте формировали буферный слой вокруг волновода шириной $4 \mu\text{m}$. Далее засвеченный резист проявляли и промывали. В открытых окнах резиста методами плазмохимии удаляли Si_3N_4 , в результате оставляли волновод нужной геометрии. После этого методом электронно-лучевого испарения готовую структуру покрывали слоем оксида кремния, этот покрывной слой является как защитным слоем, так и отражающей оболочкой волновода сверху. В данном исследовании каждый волновод имеет структуру, изображенную на рис. 4, с. Фотонная интегральная схема состоит из 9 волноводов с линейными торцевыми инвертированными тейперами с идентичными геометрическими параметрами для апробации технологии полировки и расчета конечной эффективности согласования UHNA3, сваренного с SMF28, с ФИС.

4. Полировка торцов ФИС

Несколько образцов ФИС изготавливаются вместе на кремниевой пластине и, чтобы отделить их друг от друга, на пластину предварительно наносят такой полимерный материал как резист для защиты от повреждений и разрезают алмазным скрайбером, установки для резки различных материалов электронной техники, отступая около $100 \mu\text{m}$ от кончиков тейперов, чтобы избежать повреждения волноводов ФИС при резке. Торцы образцов после разделения имеют высокую шероховатость, что является критическим параметром при согласовании оптического волокна и волновода через торцевые тейперы, поэтому необходимо поверхности торцов ФИС отполировать. Полировка торцов ФИС производилась с помощью автоматической системы оптической полировки KrellTech NOVA. Образец ФИС ставился на держа-

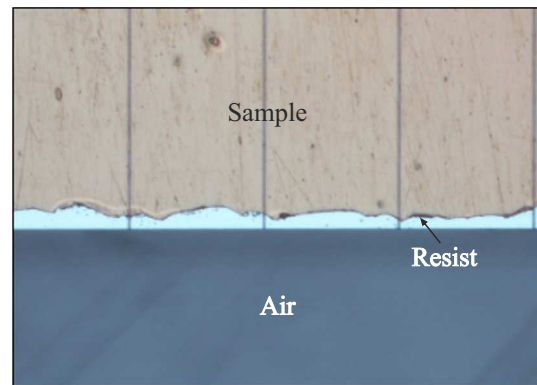


Рис. 5. Отполированный торец образца ФИС с волноводами.

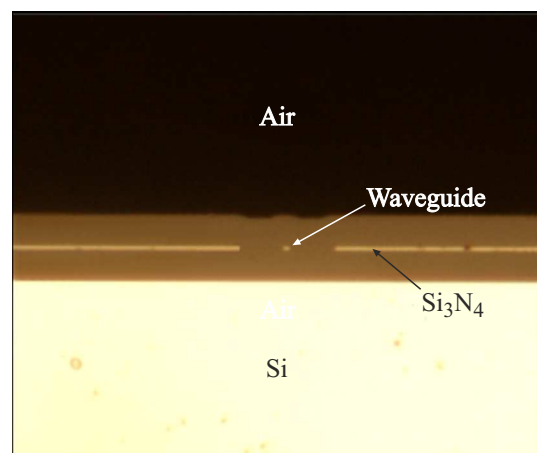


Рис. 6. После полировки кончик тейпера хорошо виден с торца ФИС.

тель в платформе установки и опускался до тех пор, пока торец образца не коснется пленки полировального диска. Образец полировался сначала на пленках с диаметром частиц абразива $3 \mu\text{m}$ из карбида кремния SiC , а затем $0.3 \mu\text{m}$ SiC . Каждую пленку можно использовать не более 7 min, чтобы частицы, образовавшиеся при полировке, не повреждали поверхность торцов ФИС, а сам образец необходимо тщательно промывать в ацетоне, деионизованной воде и изопропиловом спирте во время смены полировальных пленок. Образец полировался на пленках $3 \mu\text{m}$ SiC до тех пор, пока расстояние до кончиков тейперов не остается равным $7 - 10 \mu\text{m}$, затем оставшееся расстояние до тейперов дополировывается на пленках $0.3 \mu\text{m}$ SiC , после полировки кончики тейперов находятся на торцах ФИС (рис. 5). После этого второй торец полировался аналогичным образом. Затем образец промывался в ацетоне, деионизованной воде и спирте, предварительно прогретых до 50°C , выдерживая по 15 min в каждой жидкости для того, чтобы растворить резист и убрать остатки частиц после полировки. В данной работе удалось добиться высокого качества

полировки, и кончики тейперов хорошо видны через оптический микроскоп (рис. 6).

5. Измерение потерь пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28

Схема измерительной установки показана на рис. 7 (верхняя часть). Picosecond optical pulse generator PLS-1500/9 служит источником ИК излучения, длина волны 1550 nm. Инфракрасное излучение попадает в волокно, у которого с одной стороны — коннектор с типом полировки APC, а со второго конца вместо коннектора — подготовленная ранее структура SMF28_UHNA3. Далее ИК излучение при прохождении через преобразователь моды оптического волокна выходит из торца UHNA3 и попадает в кончик тейпера ФИС. Затем суженная мода излучения распространяется по волноводу и попадает во второй тейпер. Второй тейпер, напротив, расширяет эту моду, так как тейпер сужается в направлении распространения ИК излучения. Затем расширенная мода из тейпера попадает в сердцевину UHNA3_SMF28 и снова расширяется с помощью преобразователя моды оптического волокна. Мощность излучения из волокна UHNA3_SMF28 измеряют измерителем мощности Keysight N7744C, это мощность на выходе (P_{out}) структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 (два преобразователя моды оптического волокна стыкуются с двух сторон с помощью тейперов с волноводом ФИС). Мощность на входе (P_{in}) измеряют заменой структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 на одномодовый волоконно-оптический патч-корд длиной 0.5 м с APC-типом полировки с обеих сторон (рис. 7, нижняя часть). Зная P_{in} и P_{out} , можно рассчитать потери пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28.

Как уже было отмечено ранее, MFD оптического волокна UHNA3 и ширина кончика тейпера имеют достаточно маленькие размеры, около 4 μm и 300 nm соответственно. Поэтому процесс юстировки кончиков оптических волокон относительно кончиков тейперов занимает достаточно длительное время. Положение кончиков UHNA3 относительно кончиков тейперов регулируют с использованием пьезоподвижек 9063-XYZ-PPP-M Motorized Gothic-Arch Bearing Stage, которыми управляют через персональный компьютер. На этих подвижках зафиксированы гониометрические платформы для того, чтобы убирать угол между осью сердцевины волокна и осью волновода ФИС. Волокна закреплены в Simplified Fiber Clamp Thorlabs HFF003 v-groove, которые приклеены к гониометрическим платформам. Фотонная интегральная схема закреплена на держателе, этот держатель оснащен микрометрическим винтом, чтобы дополнительно иметь возможность контролировать угол между осью сердцевины волокна и осью волновода ФИС. Также измерительная установка оснащена одной камерой

Moticam 4000, чтобы проверять соосность положений кончиков оптических волокон и волноводов с тейперами ФИС.

В этой части юстировки винты пьезоподвижек поворачивают вручную. В процессе юстировки волокно относительно волновода необходимо двигать с очень маленьким шагом — от 30 до 600 nm, точно попадая в центральный максимум дифракции, возникающей при прохождении излучения 1.55 μm через сердцевину 1.8 μm в UHNA3. Сначала волокна помещаются в v-groove и с помощью гониометров и пьезоподвижек оптические волокна SMF28_UHNA3 и UHNA3_SMF28 ставят соосно. Затем волокна отводят друг от друга и между ними помещают держатель с ФИС. Волноводы должны быть соосны сердцевинам волокон, чтобы уменьшить потери на ввод излучения, поэтому с помощью камеры и держателя с ФИС, оснащенного микрометрическим винтом, образец ФИС поворачивают до тех пор, пока сердцевины волокна и волновод не станут соосны. Следующая часть эксперимента проводится на 9063-XYZ-PPP-M Motorized Gothic-Arch Bearing Stage и программном обеспечении через персональный компьютер. Сначала ставится шаг, равный 600 nm, и оптическое волокно SMF28_UHNA3 перемещают относительно волновода в Z-, Y-, X-направлениях в положение с максимальной мощностью. Затем второе оптическое волокно UHNA3_SMF28 перемещают так, чтобы мощность возросла и достигла нового максимума. Вслед за этим шаг уменьшается до 300 nm и эксперимент повторяется с оптическими волокнами SMF28_UHNA3 и UHNA3_SMF28. Затем так необходимо сделать для шагов 150, 60 и 30 nm. После процесса юстировки оптические волокна SMF28_UHNA3 и UHNA3_SMF28 с волноводом становятся соосными, а торцы кончиков тейперов и оптических волокон находятся на стыке, именно в этом положении мощность на выходе всегда максимальная. Значение максимальной мощности P_{out} считывают с Keysight N7744C.

6. Результаты

Данный раздел посвящен расчету потерь пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 с волноводами 5 и 7 mm, средних потерь пропускания на 1 mm и эффективности согласования ФИС с двумя оптическими волокнами SMF28, сваренными с UHNA3. Потери пропускания рассчитывают через формулу

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right), \quad (1)$$

Потери пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 с волноводами 5 и 7 mm представлены в табл. 5 и 6 соответственно. Потери пропускания каждого волновода были измерены по 5 раз. В данном исследовании была впервые апробирована и отработана технология полировки

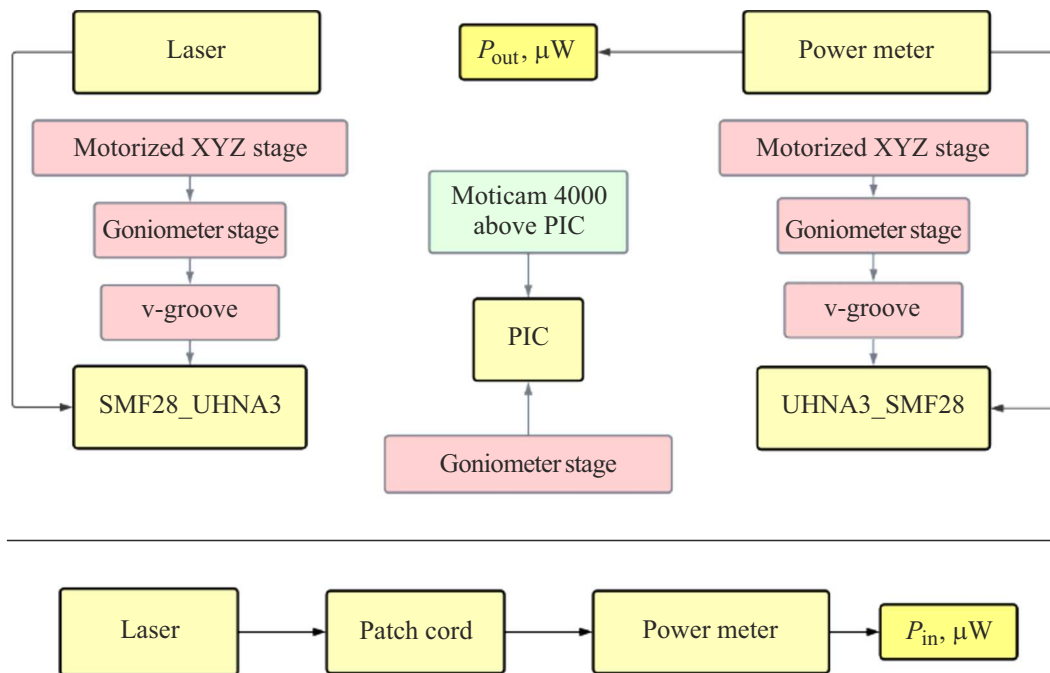


Рис. 7. Измерительная установка.

Таблица 5. Потери пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 с длиной волноводов 5 mm

Образец №1	Волновод 5 mm
№ волновода	Потери, dB
2	14.1 ± 0.3
3	15.5 ± 0.4
4	15.8 ± 0.9
6	11.0 ± 0.2
7	12.5 ± 0.2
9	12.3 ± 2.4

торцов ФИС (разд. 4), процесс полировки начали применять с образца №1, поэтому шероховатость поверхности на нем выше в сравнении с образцом №2, а разброс в значениях потерь пропускания между разными волноводами выше. Для образца №2 относительная дисперсия потерь пропускания составила 7.9%, для волноводов образца №1 относительная дисперсия составила 8.7%. Также следует отметить, что оптическое волокно и покрывная оболочка ФИС изготовлены из SiO₂, являющимся очень хрупким материалом, поэтому по мере работы с оптическими волокнами и ФИС, их потери пропускания возрастают из-за появления сколов на торцах оптических волокон и покрывной оболочки ФИС. При сравнении табл. 5 и 6 видны большие потери

Таблица 6. Потери пропускания структуры SMF28_UHNA3_ФИС_UHNA3_SMF28 с длиной волноводов 7 mm

Образец №2	Волновод 7 mm
№ волновода	Потери, dB
1	17.5 ± 0.1
2	15.0 ± 0.1
3	16.9 ± 0.7
4	16.6 ± 0.5
6	16.2 ± 0.2
7	17.8 ± 0.3

Таблица 7. Потери пропускания на 1 mm волновода

Средние потери для волноводов 7 mm, dB	Средние потери для волноводов 5 mm, dB	Средние потери пропускания, dB/mm
16.4 ± 1.3	12.1 ± 1.0	2.1

пропускания на 1 mm для волноводов длиной 5 и 7 mm, в табл. 7 представлены средние потери пропускания на 1 mm длины волновода Si₃N₄.

В ходе работы была отработана технология сварки оптических волокон SMF28 и UHNA3 с относительно малыми потерями, усредненное значение потерь состав-

ляло 1 dB на сварку. Учитывая погонные потери Si₃N₄ волновода, эффективность согласования одного волокна на один торец ФИС в нашей работе составляет около −0.7 dB, формула расчета представлена ниже, где L_w — средние потери на волновод, L_{sp} — средние потери на сварку волокон, L_{mm} — средние потери на 1 mm волновода:

$$(L_w - L_{sp} - L_{mm})/2. \quad (2)$$

Заключение

Настоящая работа посвящена измерению эффективности согласования волновода с торцевым линейным инвертированным тейпером и оптического волокна SMF28, сваренного с УHNA3. Главная задача при вычислении эффективности согласования состоит в том, чтобы выявить основные механизмы, влияющие на потери, и уменьшить это влияние с целью увеличения пропускной способности, необходимой для дальнейшего внедрения в квантовые технологии. Для этого были изготовлены две структуры ФИС длиной волноводов 5 и 7 mm. Каждая ФИС состояла из 9 волноводов из Si₃N₄, все волноводы имели по 2 линейных торцевых инвертированных тейпера для согласования с оптическими волокнами, с помощью которых ИК излучение вводится и выводится из волновода. Оптические волокна представляли собой структуру оптического волокна SMF28, сваренного с УHNA3. Данная структура имеет низкие средние потери на сварке менее 1 dB. Это сравнительно новая технология сварки, которая также была отработана в данной работе. Были измерены и рассчитаны средние потери пропускания для двух длин волноводов, зная которые были выявлены большие потери пропускания волновода, составившие 2.1 dB/mm. В итоге была рассчитана эффективность согласования, которая оказалась высокой и составила −0.7 dB.

Финансирование работы

Настоящие исследования были выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00187, <https://www.rscf.ru/project/23-12-00187/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] X. Mu, S. Wu, L. Cheng, H.Y. Fu. Appl. Sci., **10** (4), 1538 (2020). DOI: 10.3390/app10041538
- [2] C. Sparrow, E. Martín-López, N. Maraviglia, A. Neville, C. Harrold, J. Carolan, Y.N. Joglekar, T. Hashimoto, N. Matsuda, J.L. O'Brien, D.P. Tew, A. Laing. Nature, **557**, 660–667 (2018). DOI: 10.1038/s41586-018-0152-9
- [3] G.R. Steinbrecher, J.P. Olson, D. Englund, J. Carolan. npj Quantum Inf., **5**, 60 (2019). DOI: 10.1038/s41534-019-0174-7
- [4] H. Choi, M. Pant, S. Guha, D. Englund. npj Quantum Inf., **5**, 104 (2019). DOI: 10.1038/s41534-019-0215-2
- [5] T.L. Koch, U. Koren. IEEE J. Quant. Electron., **27** (3), 641–653 (1991). DOI: 10.1109/3.81373
- [6] D.J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroeck, A. Leinse, C. Roeloffzen. Proc. IEEE, **106** (12), 2209–2231 (2018). DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576
- [7] C.R. Doerr. Frontiers Phys., **3**, 37 (2015). DOI: 10.3389/fphy.2015.00037
- [8] M.A. Tran, D. Huang, T. Komljenovic, J. Peters, A. Malik, J. Bowers. Appl. Sci., **8** (7), 1139 (2018). DOI: 10.3390/app8071139
- [9] Hui Wang, Jian Qin, Xing Ding, Ming-Cheng Chen, Si Chen, Xiang You, Yu-Ming He, Xiao Jiang, L. You, Z. Wang, C. Schneider, Jelmer J. Renema, Sven Höfling, Chao-Yang Lu, Jian-Wei Pan. Phys. Rev. Lett., **123** (25), 250503 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.250503
- [10] *Лазерные технологии* [Электронный ресурс]. URL: https://online.mephi.ru/courses/new_technologies/laser/data/lecture/9/p5.html
- [11] *Оптическое волокно Corning SMF-28 Ultra. Описание изделия* [Электронный ресурс]. URL: https://www.ssd.ru/upload/iblock/214/smf_28ultra.pdf
- [12] Н.В. Никоноров, С.М. Шандаров. *Волноводная фотоника. Учебное пособие, курс лекций* (СПбГУ ИТМО, СПб., 2008).
- [13] *Ultra-High NA Single-Mode Fibers* [Электронный ресурс]. URL: https://www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/specialty-optical-fibers/uhna3_spec_20201122126.pdf
- [14] S. Preble. *UHNA Fiber — Efficient Coupling to Silicon Waveguides. Application Note NuAPP-3* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.coherent.com/resources/application-note/components-and-accessories/specialty-optical-fibers/uhna-fiber-efficient-coupling-to-silicon-waveguides.pdf>
- [15] S. Chuang. *Physics of Photonic Devices* (John Wiley & Sons, NJ, 2009).
- [16] C. Kopp, S. Bernabé, B.B. Bakir, J.M. Fedeli, R. Orobtschouk, F. Schrank, H. Porte, L. Zimmermann. IEEE J. Sel. Top. Quant., **17** (3), 498–509 (2011). DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2071855
- [17] G.T. Reed, A.P. Knights. *Silicon Photonics: An Introduction* (John Wiley & Sons, NJ, 2004).
- [18] Y. Ding, J. Xu, F. Da Ros, B. Huang, H. Ou, C. Peucheret. Opt. Express, **21** (8), 10376–10382 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.010376
- [19] T. Ramadan, R.M. Osgood. J. Lightwave Technol., **16** (2), 277 (1998).
- [20] P. Suchoski, R. Ramaswamy. IEEE J. Sel. Top. Quant., **23** (2), 205–211 (1987). DOI: 10.1109/JQE.1987.1073307
- [21] S.J. Hettrick, J. Wang, C. Li, J.S. Wilkinson, D.P. Shepherd. J. Lightwave Technol., **22** (3), 845–849 (2004). DOI: 10.1109/JLT.2004.824548
- [22] X. Mu, S. Wu, L. Cheng, X. Tu, H. Fu. *OSA Technical Digest (Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS)* (Optica Publishing Group, Washington, 2019). DOI: 10.1364/FIO.2019.JTu3A.66
- [23] P. Cheben, D.X. Xu, S. Janz, A. Densmore. Opt. Express, **14** (11), 4695–4702 (2006). DOI: 10.1364/OE.14.004695

- [24] M.J. Picard, C. Latrasse, C. Larouche, Y. Painchaud, M. Poulin, F. Pelletier, M. Guy. Proc. SPIE OPTO, **9752**, 132–138 (2016). DOI: 10.1117/12.2208629
- [25] J.K. Doylend, A.P. Knights. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., **12** (6), 1363–1370 (2006). DOI: 10.1109/JSTQE.2006.884409
- [26] J.-M. Lee, D.-J. Kim, H. Ahn, S.-H. Park, G. Kim. J. Lightwave Technol., **25** (8), 2236–2243 (2007). DOI: 10.1109/JLT.2007.899792
- [27] M. Fritze, J. Knecht, C. Bozler, C. Keast, J. Fijol, S. Jacobson, P. Keating, J. LeBlanc, E. Fike, B. Kessler, M. Frish, C. Manolatu. J. Vacuum Sci. Technol. B, **21** (6), 2897–2902 (2003). DOI: 10.1116/1.1625967
- [28] Q. Fang, T.S. Liow, J. Song, C. Tan, M. Yu, G. Lo, Kwong, D.L. Opt. Express, **18** (8), 7763–7769 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.007763