

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 535.93, 681.7.068

**СОПРЯЖЕНИЕ КРИСТАЛЛА ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЛЬЦЕВОГО
МИКРОРЕЗОНАТОРА С ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ¹**

**©2026 г. Д. В. Горелов^{а,*}, С. С. Генералов^а, Н. А. Моляков^а, В. В. Амеличев^а,
В. В. Светухин^а, А. И. Абанин^{а, b, **}, П. А. Итрин^б, И. С. Паняев^б,
Д. А. Коробко^б, А. А. Фотиади^б**

^аНПК “Технологический центр”

Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр.7

^бУльяновский государственный университет,

Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

**E-mail: D.Gorelov@tcen.ru*

***E-mail: aai-2000@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Рассматриваются разработка кристалла интегрального кольцевого микрорезонатора (МКР) и экспериментальное исследование метода эффективного сопряжения его с оптическим волокном (ОВ) PM1550 посредством короткого участка высокоапертурного оптического волокна UHNA4. Актуальность работы обусловлена интенсивным развитием интегральной фотоники и необходимостью создания эффективных методов сопряжения с оптическими волокнами. Авторами представлены экспериментальные результаты торцевого сопряжения кремниевого кристалла МКР с оптическими волокнами, уложенными в V-образные канавки, сформированные на кремниевых кристаллах. МКР представляет собой фотонную интегральную схему (ФИС) реализованную на основе технологии интегральных оптических волноводов (ИОВ). Для снижения потерь при сопряжении кристалла МКР с ОВ реализован волоконный конвертер мод на основе комбинации оптических волокон PM1550 и UHNA4. Оптические потери на сварном соединении PM1550-UHNA4 составляют примерно 0.2 дБ. Проведены экспериментальные исследования оптических характеристик сборки тестового кристалла МКР с ОВ, в том числе, определены спектральные параметры МКР, потери на распространение в ИОВ и эффективность сопряжения их с ОВ. Получены значения собственных и нагруженных добротностей МКР, а также исследована временная стабильность клеевого соединения в областях сопряжения. Из представленных результатов следует, что предложенный метод позволяет получить достаточно низкие вносимые потери (1.28 ± 0.1 дБ) на сопряжение кристалла МКР с ОВ и достаточно высокую стабильность (± 0.15 дБ), наблюдаемую в течение 13 рабочих недель. Измеренное значение оптических потерь в прямом ИОВ составляло примерно 0.73 дБ/см, а расчетная величина затухания сигнала в МКР на основе измеренного спектра равнялась 1.9 дБ/см.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26-28 мая 2026 г.

Ключевые слова: интегральный оптический волновод, фотонная интегральная схема, волоконный массив, оптические волокна, интегральный кольцевой микрорезонатор, частотная рефлектометрия, кремниевая фотоника.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие интегральной фотоники. Прогресс в области интегральных платформ, основанных на существующей КМОП-технологии, открывает возможности для создания широкого спектра функциональных устройств, ранее реализуемых преимущественно в волоконном исполнении, в рамках единого кристалла [1-4]. К таким устройствам относятся направленные ответвители [5-7], резонаторы [8-12], модуляторы и электрооптические преобразователи [13-16]. Это, в свою очередь, обеспечивает значительную миниатюризацию, а также повышение устойчивости к внешним воздействиям для широкого класса фотонных и радиофотонных систем.

Практическая реализация устройств интегральной фотоники в значительной степени определяется применяемыми технологическими решениями, обеспечивающими эффективное сопряжение активных и пассивных оптических элементов. В данном контексте ключевую роль играют технологии сборки пассивных фотонных интегральных схем (ФИС), а также методы их интеграции с активными элементами.

В настоящее время значительное количество научных публикаций посвящено вопросам сопряжения ФИС с активными компонентами, включая различные подходы гибридной [17, 18] и гетерогенной [19-21] интеграции: гетерозепитаксия [22, 23], спекание пластин [24], вертикальное [25-27], либо торцевое сопряжение в формате “кристалл-кристалл” [28-31], однако реализация указанных методов, как правило, требует применения дорогостоящего технологического оборудования, а также накладывает дополнительные требования и ограничения на характеристики и конструкцию интегрируемых активных элементов. Это существенно ограничивает возможности внедрения ФИС в уже существующие фотонные системы.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффективного метода сопряжения ФИС с волоконными линиями передачи, обеспечивающего совместимость с существующими фотонными устройствами, имеющими волоконный интерфейс.

2. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МКР

Кристаллы микрорезонатора (МКР) изготовлены на основе интегральных оптических волноводов (ИОВ) с высоким аспектным соотношением ширины и высоты сердцевин из

Si_3N_4 : $W_{\text{core}}:H_{\text{core}} \approx 12$. Значения W_{core} и H_{core} составляли 2000 нм и 170 нм, соответственно. В качестве верхней и нижней оболочек использовался SiO_2 толщиной 10 мкм и 6.4 мкм. Эскиз поперечного сечения изготовленных ИОВ показан на рис. 1а. На рис. 1б представлен снимок внешнего вида кристалла МКР. Распределения напряженностей электрических полей для фундаментальных TE_0 и TM_0 мод в ИОВ показаны на рис. 1в. Топология МКР приведена на рис. 1г.

Рис. 1. Конфигурация ИОВ на основе Si_3N_4

Радиус R изгиба ИОВ в МКР был выбран равным 1500 мкм для полного исключения оптических потерь для двух фундаментальных мод. Значения длины L_c и зазора g между ИОВ в областях связи составляли 1100 мкм и 2.3 мкм, соответственно. Длина МКР $L_{\text{МКР}}$ равнялась 13.82 мм. В представленной работе оценка вносимых потерь на оптическом сопряжении “волокно-ИОВ”, а также измерение спектральных характеристики МКР проводились для ТМ-поляризованной моды, обладающей более низким ограничением по сравнению с ТЕ-поляризацией. Глубины проникновения ТЕ- и ТМ-мод в нижнюю оболочку составляют примерно 4 и 7 мкм, а их эффективные площади полей – примерно 1.76 мкм^2 и 4.3 мкм^2 , соответственно. ТМ-мода меньше взаимодействует с вертикальными стенками сердцевины, поэтому она обеспечивает меньшие потери при распространении. При проектировании топологии кристалла МКР конвертеры мод в виде тейпированных участков, применяемых для уменьшения рассогласования модовых полей между волокном и ИОВ, не использовались.

Эскизный маршрут изготовления МКР приведен на рис. 2. В качестве исходных подложек использовались пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 (100) с двусторонней полировкой толщиной 430 мкм.

Рис. 2. Эскизный технологический маршрут изготовления МКР

Процесс изготовления начинался с формирования нижней оболочки из слоя SiO_2 толщиной 10 мкм. Затем осаждался слой Si_3N_4 толщиной 170 нм, по которому формировалась фоторезистивная маска (ф/р-маска) с последующим процессом плазмо-химического травления (ПХТ) пленки Si_3N_4 . На завершающем этапе формировалась верхняя оболочка из SiO_2 толщиной примерно 6.4 мкм. После изготовления ИОВ Si-подложки разделялись на кристаллы с последующей полировкой торцов.

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕМНИЕВОГО ОДИНОЧНОГО ВОЛОКОННОГО МАССИВА

Для обеспечения надёжного торцевого сопряжения оптических волокон с кристаллом МКР были изготовлены одиночные массивы, эскизы торца и продольного сечения которых показаны на рис. 3. Конструктивно волоконный массив представляет собой Si-кристалл-основание со сформированной V-образной канавкой, изготавливаемой путем анизотропного химического жидкостного травления (АЖХТ) кремния в 33-процентном растворе гидроксида калия (KOH) [32]. Для фиксации уложенного в канавку волокна использовалась крышка, представляющая собой кварцевый кристалл заданного размера, изготавливаемый путем резки кварцевой подложки диаметром 100 мм и толщиной 525 мкм.

Рис. 3. Эскиз торца (слева) и продольного сечения (справа) одиночного волоконного массива

Кристаллы с V-образной канавкой были изготовлены из Si-подложек марки КЭФ-4,5 (100) с односторонней полировкой толщиной 460 мкм. Эскиз маршрута изготовления кристалла-основания с V-образной канавкой представлен на рис. 4.

На первом этапе изготовления формировалась маска из термического SiO_2 толщиной 0.65 мкм. Окна травления в оксиде изготавливались посредством контактной фотолитографии. Результатом травления Si методом АЖХТ является сформированная V-образная канавка с боковыми стенками, ориентированными по плоскости (111) под углом 54.8° к поверхности (100), как это показано на рис. 4.

Рис. 4. Эскизный технологический маршрут изготовления кристалла-основания с V-образной канавкой

Ширина окна травления Si $W_{\text{тр}}$, равная 244 мкм, обеспечивает укладку участка волокна диаметром 125 мкм заподлицо с верхней поверхностью кристалла. Глубина травления $H_{\text{тр}}$ составила 172 мкм. Снимок кристалла-основания и кварцевой крышки после изготовления представлен на рис. 5.

Рис. 5. Внешний вид изготовленных кристалла-основания с V-образной канавкой и кварцевой крышки

Одной из главных задач при разработке ФИС является эффективная оптическая связь волокон с ИОВ на кристалле. Потери возникают из-за значительного несоответствия размеров модовых полей между одномодовыми волокнами, диаметр сердцевин которых составляет около 9-10 мкм, и ИОВ, поперечное сечение которых составляет несколько микрон. Это несоответствие приводит к существенным потерям при сопряжении, что в разы снижает функциональность устройств.

Эффективность связи η между оптическим волокном и ИОВ обычно определяется произведением двух составляющих – эффективности отражения Френеля η_f и эффективности перекрытия мод η_c [33]:

$$\eta = \eta_f \eta_c. \quad (1)$$

Эффективность отражения Френеля η_f учитывает потери на отражение из-за разницы эффективных показателей преломления между модами оптического волокна и ИОВ. Эффективность Френеля может быть выражена по формуле [33]

$$\eta_f = \frac{4n_{eff}}{(1 + n_{eff})^2}, \quad (2)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления ИОВ.

Термин «эффективность перекрытия мод» (η_c) учитывает перекрытие между профилями мод оптического волокна и ИОВ, определяемое следующим образом [33]:

$$\eta_c = \left| \frac{\iint_A E_{\text{fiber}}(x, y) E_{\text{wg}}(x, y) dx dy}{\sqrt{\iint_A |E_{\text{fiber}}(x, y)|^2 dx dy} \sqrt{\iint_A |E_{\text{wg}}(x, y)|^2 dx dy}} \right|, \quad (3)$$

где E_{fiber} и E_{wg} – распределения электрических полей в волокне и ИОВ, соответственно.

Для уменьшения оптических потерь на торцевом соединении “волокно-ИОВ” разработан волоконный конвертер мод, представляющий собой сварку волокна с сохранением поляризации (PM1550) и волокна с высокой числовой апертурой (UHNA4), обеспечивающего уменьшение диаметра модового поля с 10.5 ± 0.5 мкм до 4 ± 0.3 мкм на длине волны 1550 нм. На рис. 6 представлено сравнение размеров модовых полей на выходе из волокон PM1550 и UHNA4, соответственно.

Рис. 6. Сравнение размеров модовых полей на выходе волокон PM1550 и UHNA4 на длине волны 1550 нм

Распределения полей как функции пространства при торцевом методе сопряжения для схем PM1550-ИОВ и UHNA4-ИОВ показаны на рис. 7а,б.

Рис. 7. Передача оптической мощности от оптического волокна к ИОВ торцевым методом

Расчетные значения вносимых оптических потерь при торцевом вводе/выводе посредством PM1550 и UHNA4 для ТМ-моды в ИОВ сечением $170 \text{ нм} \times 2000 \text{ нм}$ составляют 5.4 дБ и 0.92 дБ. Минимальные вносимые потери на сварном соединении достигнуты путем

оптимизации параметров процесса сварки с контролем пропускания излучения через свариваемые волокна в режиме реального времени. Схема сварки волокон показана на рис. 8.

Волоконный конвертер изготавливался путем сварки двух оптических “пиг-тейлов” на волокне типа PM1550 с волокном UHNA4. Сварка выполнялась с помощью сварочного аппарата Fujikura FSM-100P+ (Япония). Оптический сигнал от внешнего стабильного источника на длине волны 1550 нм мощностью 0.1 мВт пропускался через структуру сваренных волокон PM1550-UHNA4-PM1550 с последующим детектированием измерителем мощности с аналоговым выходом, подключенным к осциллографу.

Рис. 8. Схема сварки и скалывания PM1550-UHNA4-PM1550 при изготовлении волоконного конвертера мод

По результатам отработки режимов сварки достигнуты минимальные воспроизводимые вносимые потери на одно сварное соединение менее 5% (примерно 0.2 дБ). Применение короткого участка UHNA4 позволяет достигать значения коэффициента поляризованного затухания в диапазоне от 30 до 40 дБ [34].

После сварки волоконный патч-корд PM1550-UHNA4-PM1550 раскалывался посередине участка волокна UHNA4 для получения двух пиг-тейлов типа PM1550-UHNA4 (рис. 8).

Для сборки кремниевых одиночных волоконных массивов использовался 6-осевой комплекс юстировки Luminos (Канада) со специализированным набором волоконных держателей. Кристалл-основание располагался на вакуумном столике. Волокно подводилось и укладывалось в массив сверху при помощи микроповоротного держателя. Ориентация волокна выполнялась по оптическому изображению (рис. 9) стержней напряжения в области сварки PM1550-UHNA4.

Приведенный на рис. 9 снимок положения волокна обеспечивает вертикальное расположение стержней напряжения. Таким образом, медленная ось волокна ориентирована поперек сердцевин ИОВ, что соответствует ТМ-поляризации.

Рис. 9. Ориентация волокна PM1550 по медленной оси

После укладки волокна в V-образную канавку (рис. 10а) устанавливалась кварцевая крышка (рис. 10б). Ориентация крышки относительно торцов кристалла-основания выполнялась микропозиционером с зондом. Затем в область участка с акрилатной оболочкой дозированно наносился УФ-клей NOA 61 (Norland, США) (рис. 10б). За счет капиллярного эффекта клей растекался вдоль V-образной канавки под волокно и крышку. Также клей

заполнял пространство канавки под участок волокна с акрилатной оболочкой диаметром 250 мкм.

Для отверждения клея использовалось прямое УФ-излучение на длине волны 365 нм (рис. 10в). После полимеризации клея волокно было прочно вклеено в основание с крышкой. На рис. 10г показан готовый массив с визуализацией выходного излучения на длине волны 1550 нм. На завершающем этапе изготовления проводился процесс полировки торцов, выполнявшийся с применением ручной полировальной станции. В качестве абразивных материалов использовались наборы алмазных пленок с зернистостью 6, 3 и 1 мкм.

Рис. 10. Вклейка оптического волокна в массив

Для финишной полировки использовалась пленка с зернистостью 0.02 мкм. В качестве суспензии использовалась деионизованная вода. Внешний вид и снимок торца изготовленного массива в области V-образной канавки приведены на рис. 11.

Рис. 11. Внешний вид (слева) и торец (справа) изготовленного одиночного волоконного массива

4. СОПРЯЖЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ВОЛОКОННЫХ МАССИВОВ С КРИСТАЛЛОМ МКР

Юстировка и приклейка оптических волокон выполнялись при помощи специализированного комплекта держателей массивов. Для фиксации кристалла МКР использовался вакуумный столик. На первом этапе сборки на лицевой стороне кристалла приклеивались кварцевые доборы толщиной 525 мкм для увеличения площади контакта приклейки. В качестве адгезива использовался УФ-клей NOA-61. Схема приклейки доборов приведена на рис. 12. Важным фактором данного этапа было недопущение попадания клея на торец ИОВ, что в дальнейшем после отверждения не позволило бы подвести массива вплотную, а также потребовало бы дополнительной полировки торца. С этой целью клей наносился сбоку от добора. Благодаря капиллярному эффекту клей растекался под добор, не образуя наплывов с торца.

Рис. 12. Схема приклейки кварцевого добора

Внешний вид кристалла МКР после приклейки кварцевых доборов для портов Input, Output и Drop приведен на рис. 13.

Рис. 13. Внешний вид сборки кристалла МКР после монтажа кварцевых

На втором этапе непосредственно выполнялась юстировка оптических волокон относительно торцов ИОВ на кристалле МКР. Грубая подстройка осуществлялась при помощи оптического излучения видимого диапазона на длине волны 650 нм. Затем на входной порт подключался DFB-лазер на длине волны 1550 нм с выходной мощностью 10 мВт. Поскольку использовался лазер с сохранением поляризации на выходе, оптический пиг-тейл входного массива подключался напрямую без применения контроллера поляризации. Путем подстройки положения волокон на всех портах на выходных плечах МКР достигались максимальные выходные мощности. После юстировки волоконные массивы отводились от кристалла МКР для нанесения на их торцы УФ-клея NOA-61. Затем массивы снова подводились к торцам кристалла и повторно юстировались для достижения минимальных потерь на проход. На завершающем этапе сборки проводилось отверждение УФ-клея. На рис. 14 показаны схема стыковки и внешний вид сборки после приклейки всех массивов по трем сторонам кристалла.

Рис. 14. Схема стыковки (слева) и вид сборки кристалла МКР с волоконными массивами

5. ИЗМЕРЕНИЕ ВНОСИМЫХ ПОТЕРЬ НА СОПРЯЖЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С КРИСТАЛЛОМ МКР

Оценка вносимых элементами сопряжения потерь осуществлялась при помощи перестраиваемого измерительного лазерного источника Santec TSL-550 (Япония), излучение мощностью 10 дБм от которого через контроллер поляризации подавалось на входной порт исследуемого МКР. Затем выходное излучение фиксировалось на выходных портах МКР при помощи оптического анализатора, что позволило получить спектральную характеристику МКР. Схема измерения и полученный оптический спектр МКР представлены на рис. 15а,б.

Рис. 15. Измерение спектральных характеристик МКР

Из спектральной характеристики на рис. 15б следует, что получено ослабление сигнала на проход порядка 6 дБ. Определение параметров МКР проводилось по результатам аппроксимации полученных спектральных зависимостей функцией Лоренца, что позволило оценить нагруженную добротность МКР (Q_{load}), рассчитанную следующим образом:

$$Q_{\text{load}} = \frac{\lambda_0}{\text{FWHM}}, \quad (4)$$

где λ_0 – резонансная длина волны, FWHM – полная ширина на уровне половины высоты.

Добротность Q_{load} , в свою очередь, позволяет определить значение собственной добротности МКР (Q_{int}) с применением формулы

$$Q_{\text{int}} = \frac{2Q_{\text{load}}}{1 + \sqrt{T_0}}, \quad (5)$$

где T_0 – часть оптической мощности, выходящей из МКР на резонансной длине волны λ_0 .

Значения собственной добротности и известных характеристик материала позволяют рассчитать величину оптических потерь α в МКР следующим образом:

$$\alpha = \frac{2\pi n_g}{Q_{\text{int}} \lambda_0}, \quad (6)$$

где n_g – групповой показатель преломления.

Таким образом, получены значения собственной и нагруженной добротностей 1.42×10^5 и 1.1×10^5 , соответственно. Рассчитана величина потерь $\alpha = 1.9$ дБ/см.

Дополнительно для оценки параметров МКР, а также для оценки эффективности сопряжения кристалла с волоконными массивами было проведено измерение рефлектограммы при помощи рефлектометра Luna OBR 5T-50 (США) с пространственным разрешением 20 мкм на центральной длине волны 1546.7 нм. Частотный диапазон измерений составлял от 191.3 до 196.4 ТГц при выходной мощности излучения от лазерного источника на уровне 3.24 мВт. Схема измерительного стенда для исследования МКР методом рефлектометрии обратного рассеяния приведена на рис. 16.

Рис. 16. Схема измерительного стенда для исследования параметров МКР

На рис. 17 приведен измеренный участок рефлектограммы МКР. На вставке приведен увеличенный участок прямолинейного ИОВ. Потери на распространение в ИОВ оцениваются по наклону зависимости возвратных потерь от расстояния (линия аппроксимации). Прохождение оптического излучения через МКР сопровождается серией отражений от неоднородностей в виде пиков на рефлектограмме [35]. Пики P_0 и P_1 соответствуют торцам прямолинейного участка ИОВ. Диапазоны пиков P_2 - P_4 , P_4 - P_6 , P_8 - P_{10} характеризуют расстояние, равное длине МКР $L_{\text{МКР}} = 13.82$ мм. Серия пиков P_3 , P_5 , P_7 , P_9 и P_{11} соответствует отражениям от торца кристалла.

Рис. 17. Измеренная рефлектограмма МКР

В основе работы рефлектометра OBR 5T-50 лежит принцип, в котором потери отражения во временной области извлекаются из данных в частотной области с помощью преобразования Фурье [36], а пространственная область разрешается с использованием группового показателя преломления распространяющейся моды, который может быть выражен следующим образом:

$$n_g = \frac{C}{v_g}, \quad (7)$$

где C – скорость света, v_g – групповая скорость распространения.

Групповая скорость распространения для ТМ моды в ИОВ, равная примерно 1.95×10^8 м/с, определяется делением физической длины ИОВ ($L_w=8$ мм) на измеренную временную задержку ($T=41.03$ пс) между входным и выходным пиками отражения от торцов кристалла. На основании полученных данных найдено значение группового коэффициента преломления (примерно 1.538) при расчетном значении 1.576. Как видно из приведенных значений, разброс n_g находится в пределах 3.8%.

В соответствии с результатами измерения МКР, оценка рефлектограммы показывает потери на распространении в прямом ИОВ примерно 0.73 дБ/см. Оптические потери на проход в схеме PM1550+UHNA4-МКР-UHNA4-PM1550 составляли примерно 4.7 дБ. Таким образом, с учетом потерь в МКР вносимые потери на сопряжении оптического волокна с ИОВ достигали примерно 1.28 ± 0.1 дБ.

6. ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ “ВОЛОКНО-ИОВ”

Долговременная стабильность является важным критерием для клеевых соединений “волокно-ИОВ”, реализованных торцевым методом. В работе проведено исследование отклонения значений потерь на проход PM1150+UHNA4-МКР-UHNA4-PM1550 в течение 13 рабочих недель за исключением выходных дней при нормальных климатических условиях (НКУ). Отправной точкой для оценки являлось значение, измеренное в день приклейки волоконных массивов. Измеренная временная стабильность сопряжения волокон с кристаллом показана на рис. 18.

Рис. 18. Измеренная временная стабильность клеевого соединения

Из зависимости на рис. 18 следует, что в течение 13 недель контроля среднее значение отклонения оптических потерь составляло ± 0.15 дБ. Полученные данные показывают хорошую долговременную стабильность клеевых соединений волокна с кристаллом МКР при НКУ.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен и экспериментально подтверждён эффективный и технологически простой метод сопряжения ФИС с оптическим волокном. В отличие от традиционных подходов, требующих сложных процессов интеграции, предложенное решение основано на торцевом соединении с использованием кремниевых кристаллов с V-образной канавкой и волоконного конвертера мод, что обеспечивает совместимость с существующими волоконно-оптическими системами. Разработанная конструкция МКР на основе Si_3N_4 продемонстрировала высокие оптические характеристики: собственная добротность составила 1.42×10^5 , оптические потери на распространение в прямолинейном ИОВ и МКР достигали примерно 0.73 дБ/см и 1,9 дБ/см соответственно. Применение волокон UHNA4 позволило существенно снизить потери по сравнению со стандартными волокнами за счёт лучшего согласования модовых полей. Суммарные потери при сопряжении ФИС с волокном составляли примерно 1.28 ± 0.1 дБ. Экспериментально подтверждены высокая воспроизводимость и долговременная стабильность клеевого соединения, что является критически важным для практической эксплуатации устройств.

Таким образом, предложенный подход может быть эффективно использован при разработке интегральных фотонных устройств, ориентированных на взаимодействие с оптической волоконной инфраструктурой, этот подход представляет собой перспективное решение для внедрения в прикладные фотонные и радиофотонные системы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Изготовление кристаллов МКР, элементов сопряжения и измерение оптических потерь методом рефлектометрии частотной области выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FNRМ-2025-0012. Отработка режимов сварки оптических волокон, исследование характеристик волоконных сборок и спектров МКР выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30017.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Capmany J., Novak D.* Microwave photonics combines two worlds //Nature photonics. 2007. V. 1. №. 6. P. 319. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.89>
- 2 *Jiao Y.* Photonic techniques for microwave systems: application to filtering and correlation radiometers. Master thesis work. 2015.
- 3 *Williamson R.C., Esman R.D.* Journal of Lightwave Technology. 2008. V. 26. №. 9. P. 1145-1153. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.923627>.
- 4 *Yao J.* Journal of lightwave technology. 2009. V. 27. №. 3. P. 314. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009551>.
- 5 *Amanti F. et al.* Photonics. 2024. V. 11. №. 6. P. 494. <https://doi.org/10.3390/photonics11060494>.
- 6 *Chiang L.Y. et al.* IEEE Photonics Technology Letters. 2021. T. 33. №. 15. P. 796. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3093725>.
- 7 *Венедиктов И. О. и др.* Журнал технической физики. 2023. Т. 93. №. 7. С. 968. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.07.55755.80-23>.
- 8 *Huang L. et al.* Laser & Photonics Reviews. 2025. V. 19. №. 2. P. 2400343. <https://doi.org/10.1002/lpor.202400343>.
- 9 *Bogaerts W. et al.* Laser & photonics reviews. 2012. V. 6. №. 1. P. 47. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>.
- 10 *Zhang L., Janyani V., Ahmadi V., et al.* Optical and Quantum Electronics. 2020. V. 52, № 6. P. 291. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02392-w>.
- 11 *Xu D. X. et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. V. 20. №. 4. P. 189. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2012.2221074>.
- 12 *Herr T., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J.* Nonlinear optical cavity dynamics: from microresonators to fiber lasers. 2016. P. 129-162. <https://doi.org/10.1126/science.aan8083>.
- 13 *Huang W.T. et al.* IEEE Nanotechnology Magazine. 2025. <https://doi.org/10.1109/MNANO.2025.3551177>.
- 14 *Lingaraju N.B.* 2025 IEEE 68th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). IEEE. 2025. P. 121-124. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS53549.2025.11244554>.
- 15 *Yan Y., Zhang H., Liu X., et al.* Laser & Photonics Reviews. 2024. V. 18, №. 12. P. 2400342. <https://doi.org/10.1002/lpor.202400342>.
- 16 *Петров В. М. и др.* Успехи физических наук. 2021. Т. 191. №. 7. P. 760. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038871>.
- 17 *Tan H. et al.* Chinese Optics Letters. 2023. V. 21. №. 11. P. 110007. <https://doi.org/10.3788/COL202321.110007>.
- 18 *Levaaur T. et al.* Optics Express. 2025. V. 33. №. 9. P. 19257. <https://doi.org/10.1364/OE.558968>.

- 19 *Lai C. K. et al.* Advances in Physics: X. 2024. V. 9. №. 1. P. 2360598. <https://doi.org/10.1080/23746149.2024.2360598>.
- 20 *Komljenovic T. et al.* Proceedings of the IEEE. 2018. V. 106. №. 12. P. 2246. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2854662>.
- 21 *Roelkens G. et al.* Laser & Photonics Reviews. 2010. V. 4. №. 6. P. 751. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900033>.
- 22 *Li J. et al.* APL Materials. 2024. V. 12. №. 11. <https://doi.org/10.1063/5.0232263>.
- 23 *Luo X. et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2016. V. 22. №. 6. P. 443. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2553453>.
- 24 *Yan Z., Li Q.* Journal of Physics D: Applied Physics. 2024. V. 57. №. 21. P. 213001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad26cd>.
- 25 *Lu H. et al.* Optics express. 2016. V. 24. №. 15. P. 16258. <https://doi.org/10.1364/OE.24.016258>.
- 26 *Yang Y. et al.* Optics Express. 2017. V. 25. №. 5. P. 5758. <https://doi.org/10.1364/OE.25.005758>.
- 27 *Lin S., Zheng X., Yao J., Djordjevic S.S., Cunningham J.E., Lee J.H., Shubin I., Luo Y., Bovington J., Lee D.Y., Thacker H.D., Raj K., Krishnamoorthy A.V.* Opt Express. 2016. V. 24. № 19. P. 21454–62. <https://doi.org/10.1364/OE.24.021454>.
- 28 *Chu T., Fujioka N., Ishizaka M.* Opt Express. 2009. V. 17. № 16. P. 14063. <https://doi.org/10.1364/OE.17.014063>.
- 29 *Zilkie A. J., Seddighian P., Bijlani B. J., Qian W., Lee D. C., Fatholouloumi S., Fong J., Shafiiha R., Feng D., Luff B. J., Zheng X., Cunningham J. E., Krishnamoorthy A. V., Asghari M.* Opt Express. 2012. V. 20. № 21. P. 23456–62. <https://doi.org/10.1364/OE.20.023456>.
- 30 *Tanaka S., Jeong S. H., Sekiguchi S., Kurahashi T., Tanaka Y., Morito K.* Opt Express. 2012. V. 20. № 27. P. 28057. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028057>.
- 31 *Yang S., Zhang Y., Grund D.W., Ejzak G.A., Liu Y., Novack A., Prather D., Lim A.E., Lo G.Q., Baehr-Jones T., Hochberg M.* Opt Express. 2014. V. 22. № 1. P. 1172. <https://doi.org/10.1364/OE.22.001172>.
- 32 *Abidin U., Majlis B. Y., Yunas J.* Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering). 2015. V. 74. №. 10. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4846>.
- 33 *Snyder A. W. et al.* Optical waveguide theory. London : Chapman and hall 1983.
- 34 *Паньков А.С, Пономарев Р.С.* Форум Микроэлектроника-2026. Школа молодых учёных: ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ. 2025. С. 205.
- 35 *Рябцев И.А., Ершов А.А., Ряйккенен Д.В., Буровихин А.П., Гапончик Р.В., Таценко И.Ю., Сташкевич А.А, Никитин А.А., Устинов А.Б.* Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 79. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-6-79-89>.

- 36 *Chen T., Lee H., Vahala K.J.* Optics express. 2014. V. 22. №. 5. P. 5196.
<https://doi.org/10.1364/OE.22.005196>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Конфигурация ИОВ на основе Si_3N_4 : а) эскиз поперечного сечения, б) внешний вид кристалла МКР с увеличенной областью топологии, в) распределение модовых полей для фундаментальных TE_0 - и TM_0 -мод в ИОВ, г) топология изготовленного кристалла МКР
- Рис. 2.** Эскизный технологический маршрут изготовления МКР: 1 – исходная Si-подложка толщиной 430 ± 10 мкм, 2 – формирование нижней оболочки из SiO_2 толщиной 10 мкм, 3 – осаждение Si_3N_4 толщиной 170 нм, 4 – формирование ф/р-маски, 5 – ПХТ Si_3N_4 , 6 – снятие ф/р-маски, 7 – осаждение верхней оболочки из SiO_2 толщиной 6.4 мкм
- Рис. 3.** Эскиз торца (слева) и продольного сечения (справа) одиночного волоконного массива
- Рис. 4.** Эскизный технологический маршрут изготовления кристалла-основания с V-образной канавкой: 1 – исходная Si-подложка толщиной 460 мкм, 2 – окисление Si на толщину 0.65 мкм, 3 – формирование ф/р-маски, 4 – ПХТ SiO_2 до Si + снятие ф/р-маски, 5 – АЖХТ Si в KOH, 6 – ЖХТ SiO_2
- Рис. 5.** Внешний вид изготовленных кристалла-основания с V-образной канавкой и кварцевой крышки. На вставке показана увеличенная область канавки с её размерами.
- Рис. 6.** Сравнение размеров модовых полей на выходе волокон PM1550 и UHNA4 на длине волны 1550 нм
- Рис. 7.** Передача оптической мощности от оптического волокна к ИОВ торцевым методом: а) для PM1550, б) для UHNA4
- Рис. 8.** Схема сварки и скалывания PM1550-UHNA4-PM1550 при изготовлении волоконного конвертера мод
- Рис. 9.** Ориентация волокна PM1550 по медленной оси
- Рис. 10.** Вклейка оптического волокна в массив: а) укладка волокна в V-образную канавку, б) монтаж крышки и нанесение клея, в) процесс отверждения клея УФ-лампой на длине волны 365 нм, г) визуализация выходного излучения на длине волны 1550 нм после приклейки
- Рис. 11.** Внешний вид (слева) и торец (справа) изготовленного одиночного волоконного массива
- Рис. 12.** Схема приклейки кварцевого добора: вид с торца кристалла (слева), вид сверху (справа)

- Рис. 13.** Внешний вид сборки кристалла МКР после монтажа кварцевых доборов для увеличения площади контакта склейки
- Рис. 14.** Схема стыковки (слева) и вид сборки кристалла МКР с волоконными массивами после приклейки (справа)
- Рис. 15.** Измерение спектральных характеристик МКР: а) схема измерительного стенда, б) измеренный спектр на выходе портов “Output” и “Drop”
- Рис. 16.** Схема измерительного стенда для исследования параметров МКР методом рефлектометрии обратного рассеивания
- Рис. 17.** Измеренная рефлектограмма МКР. На вставке показана линейная аппроксимация для определения потерь в прямолинейном ИОВ
- Рис. 18.** Измеренная временная стабильность клеевого соединения PM1550+UHNA4-МКР-UHNA4-PM1550 при НКУ

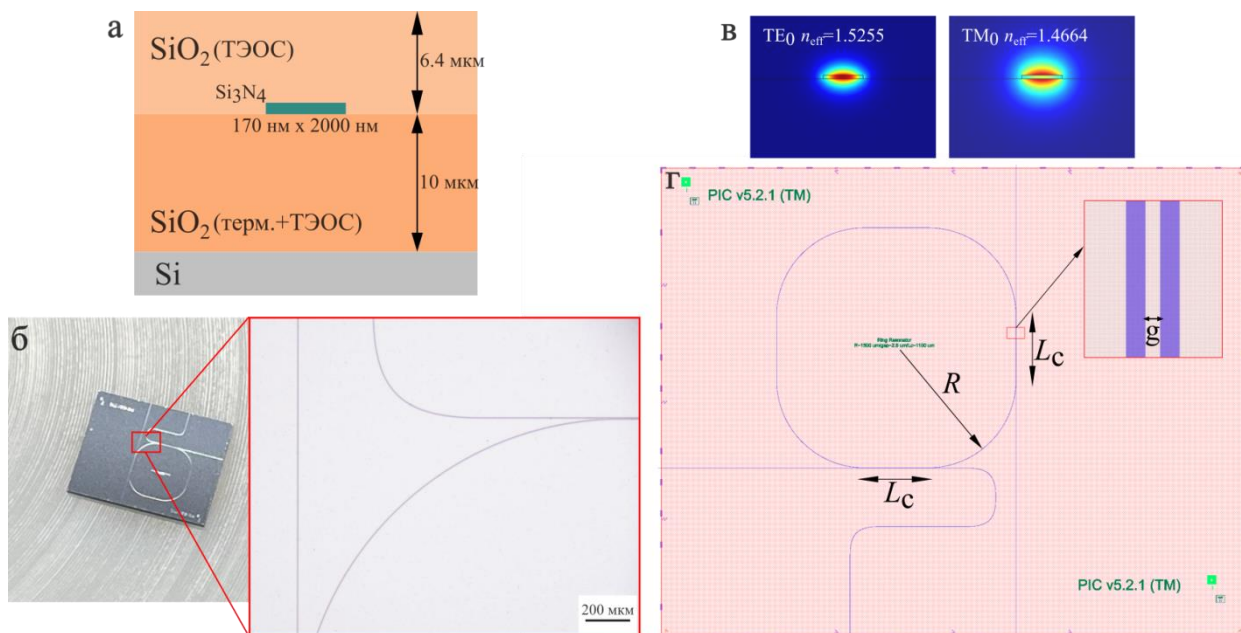


Рис. 1.

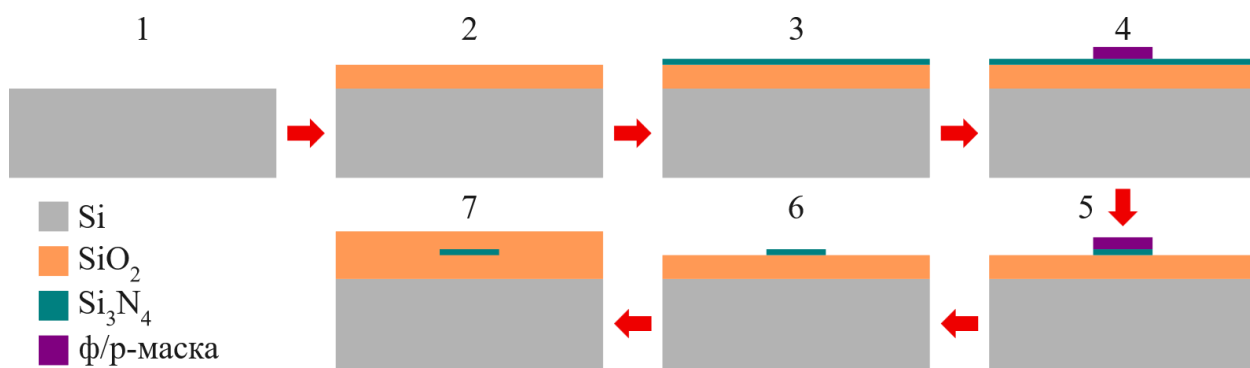


Рис. 2.

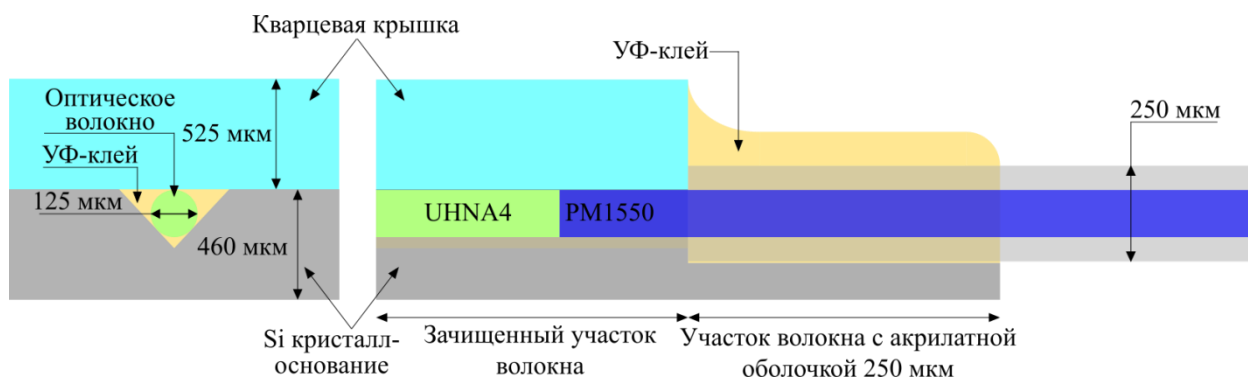


Рис. 3.

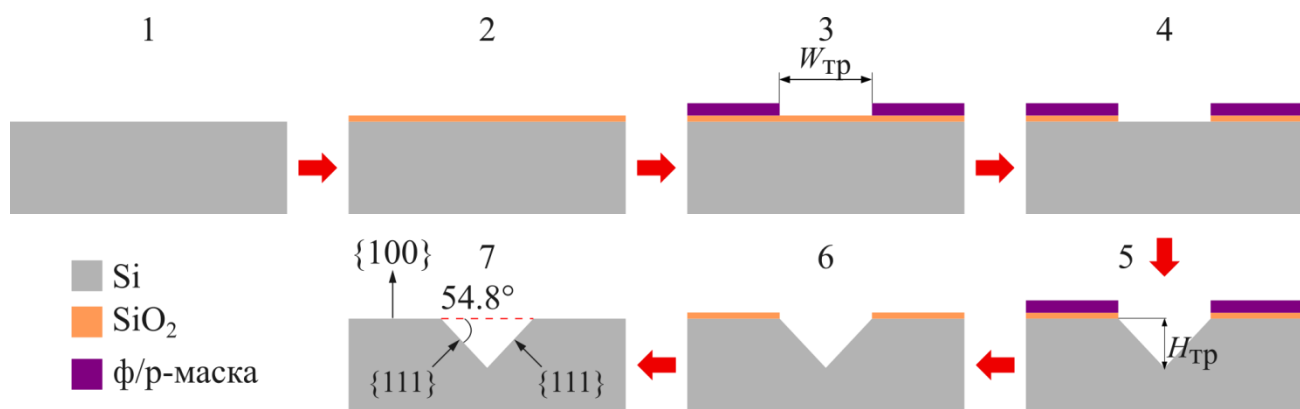
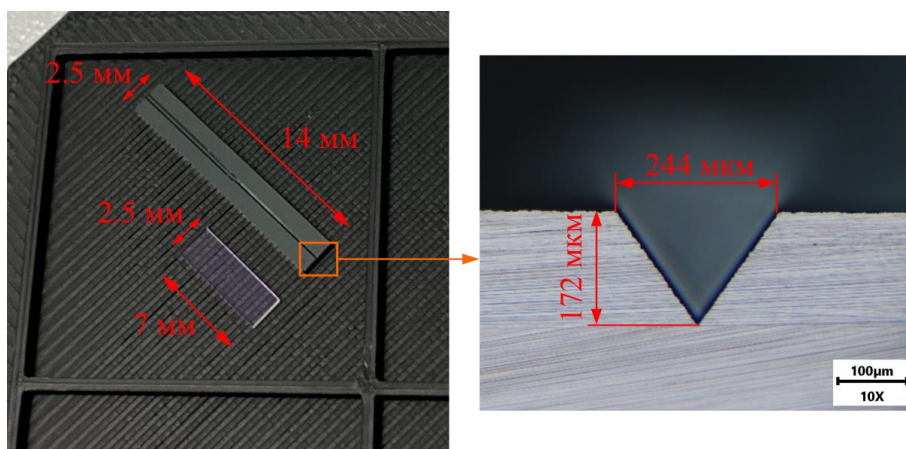


Рис. 4.



С:

Рис. 5.

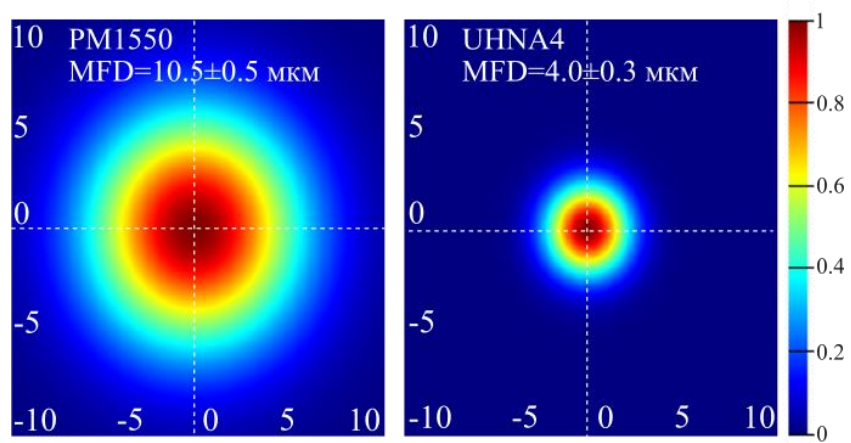


Рис. 6.

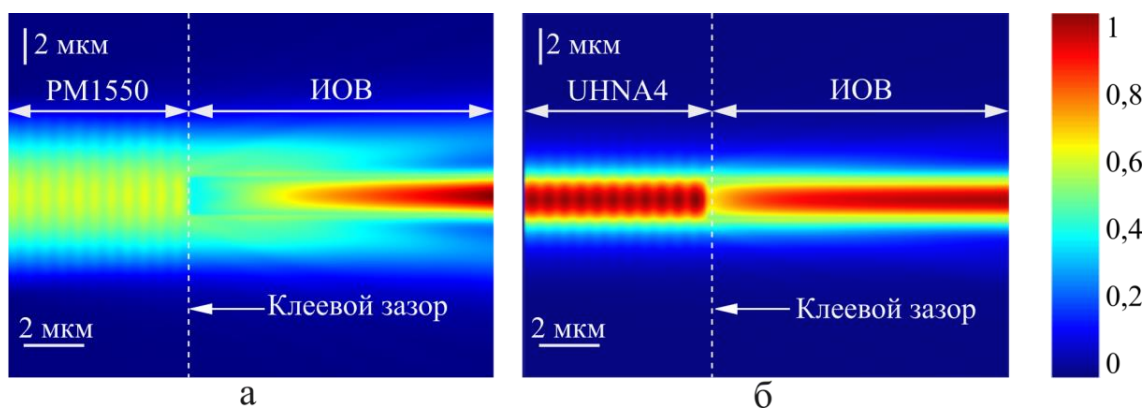


Рис. 7.

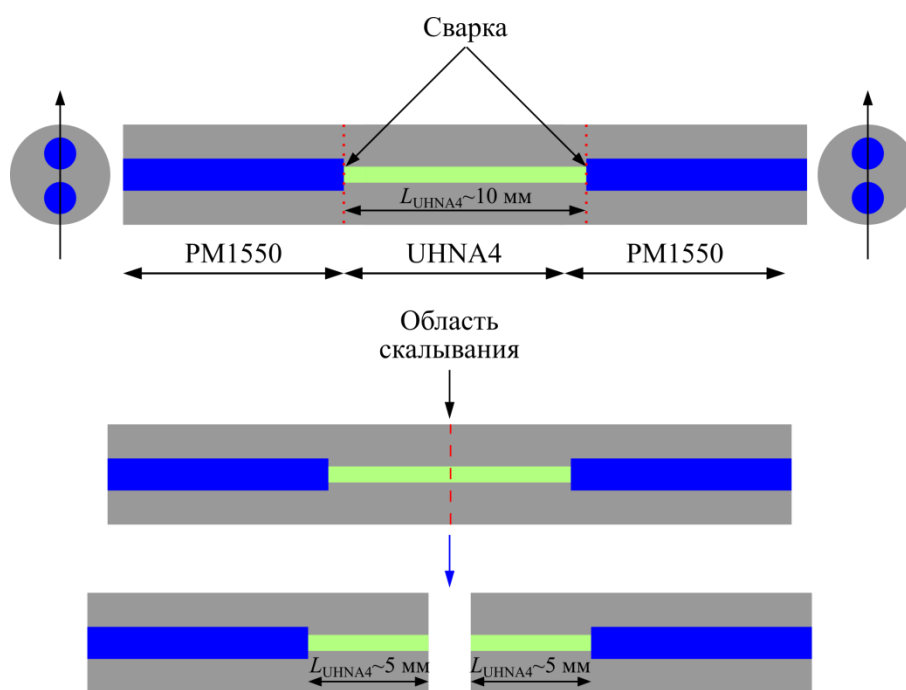


Рис. 8.

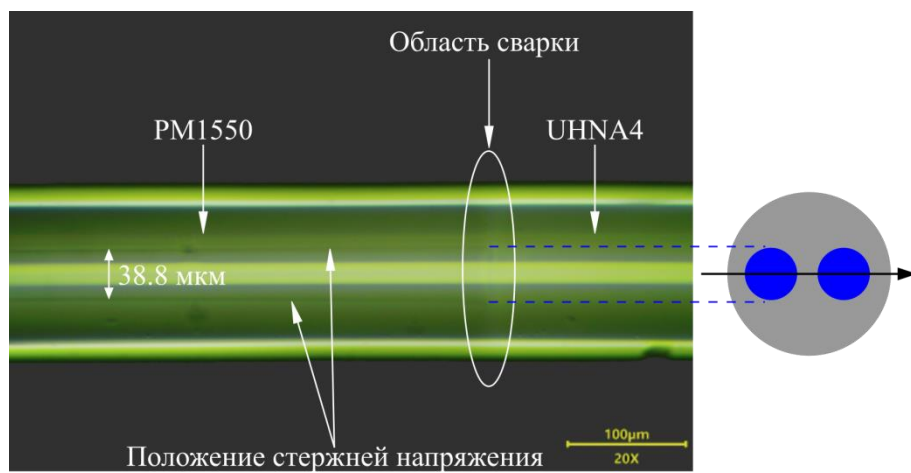


Рис. 9.

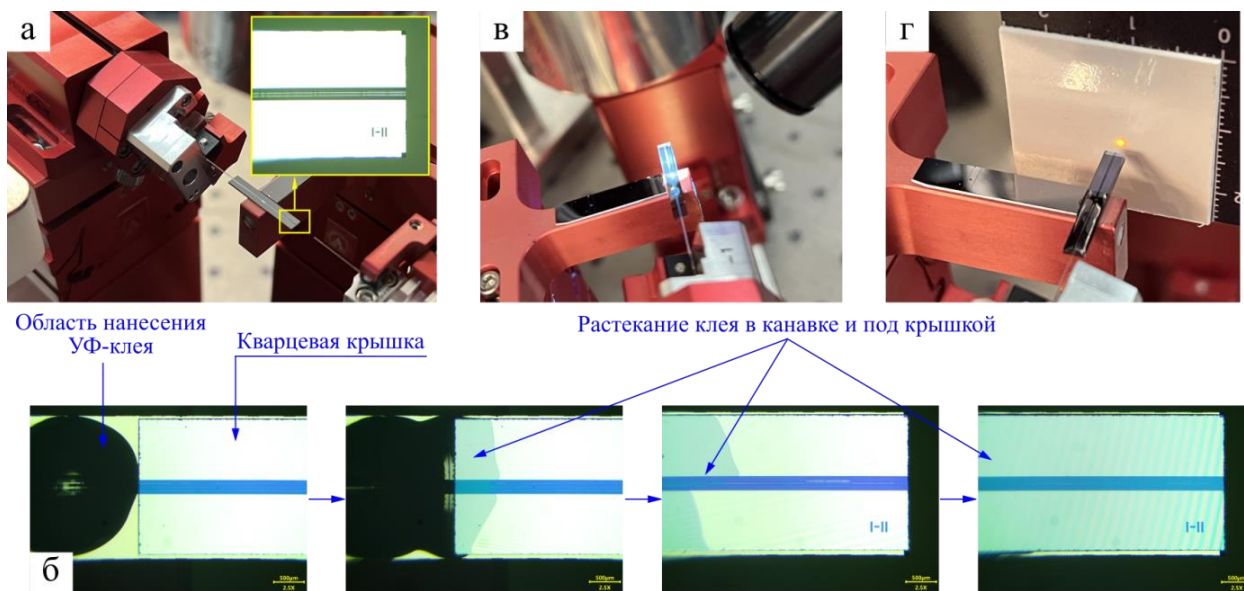


Рис. 10.

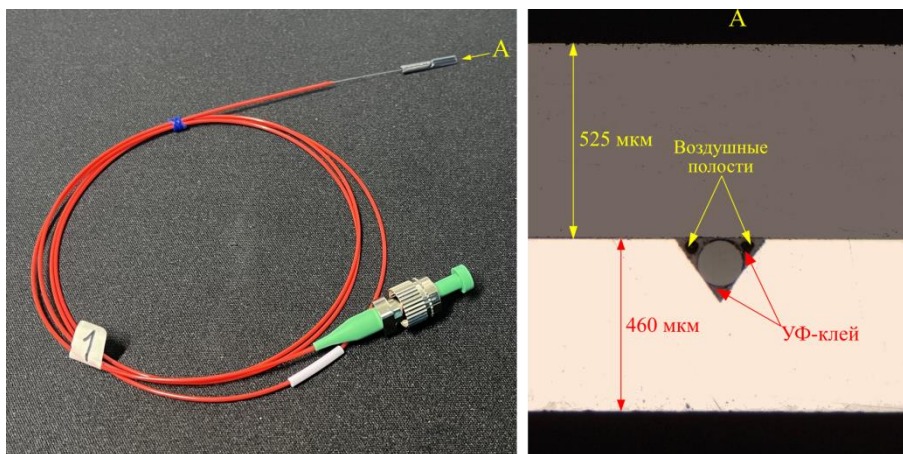


Рис. 11.

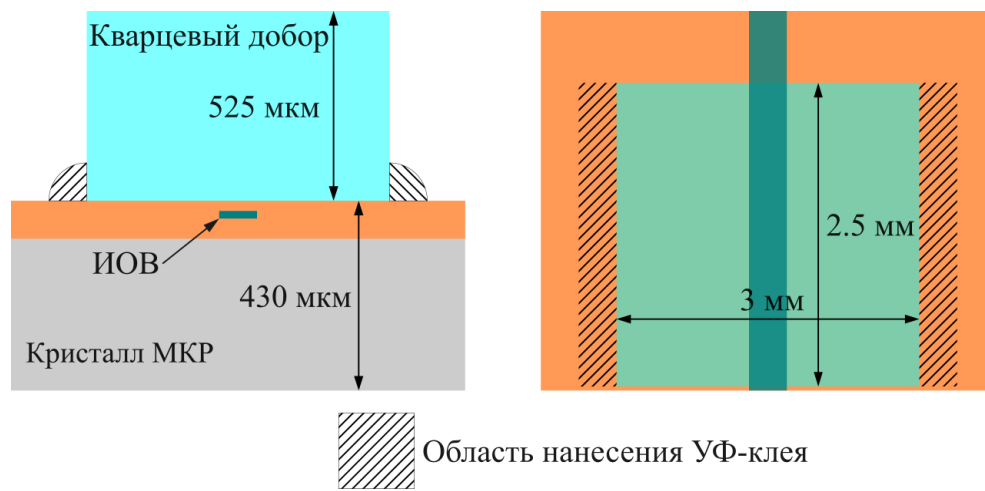


Рис. 12.

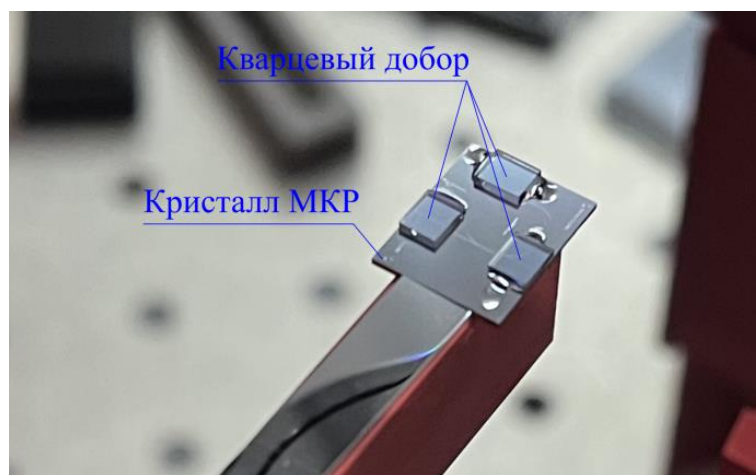


Рис. 13.

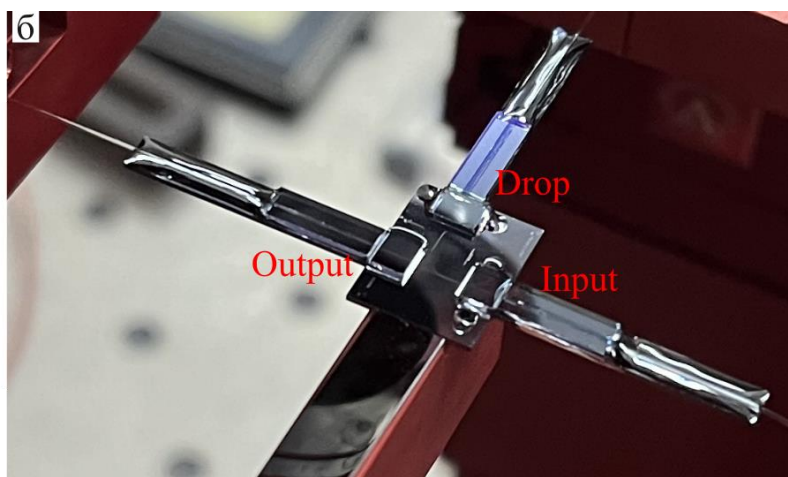
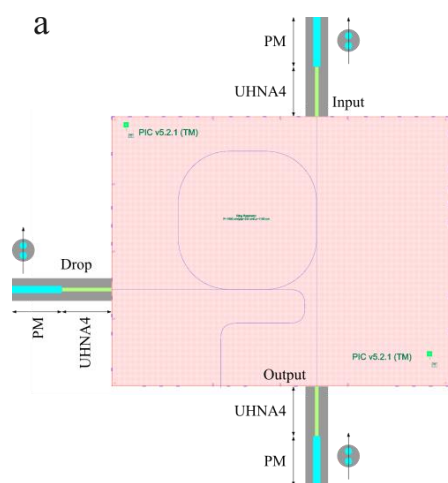


Рис. 14.

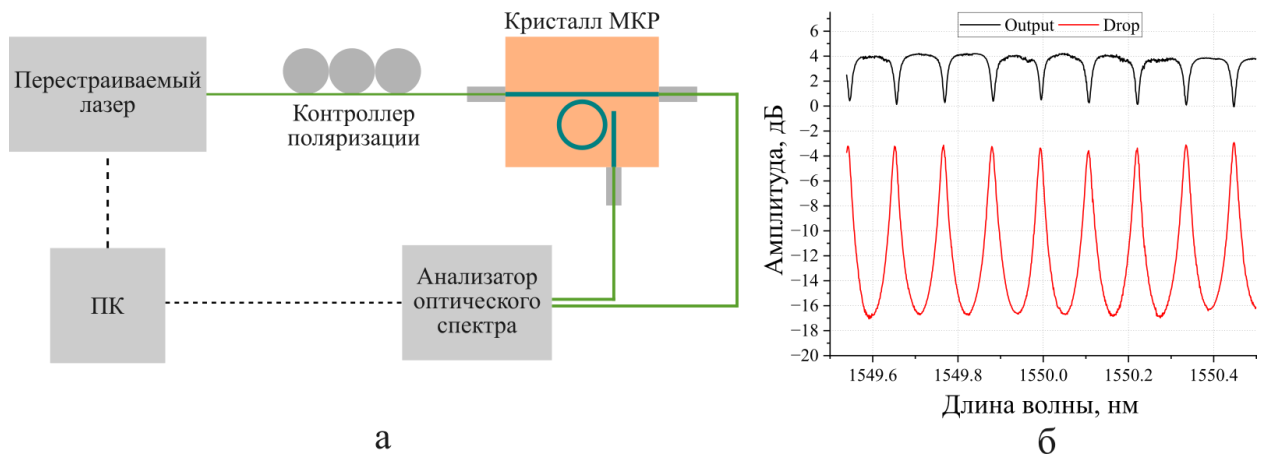


Рис. 15.

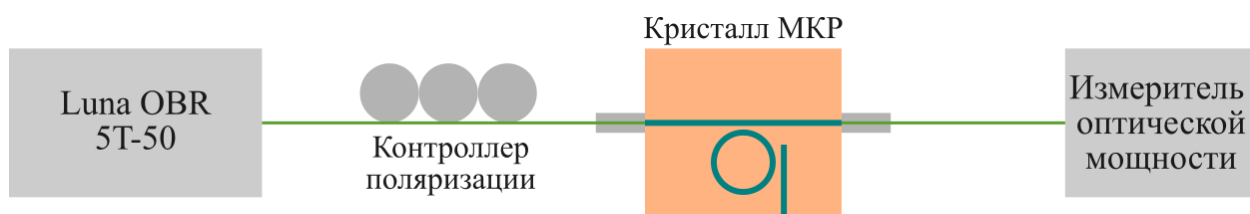


Рис. 16.

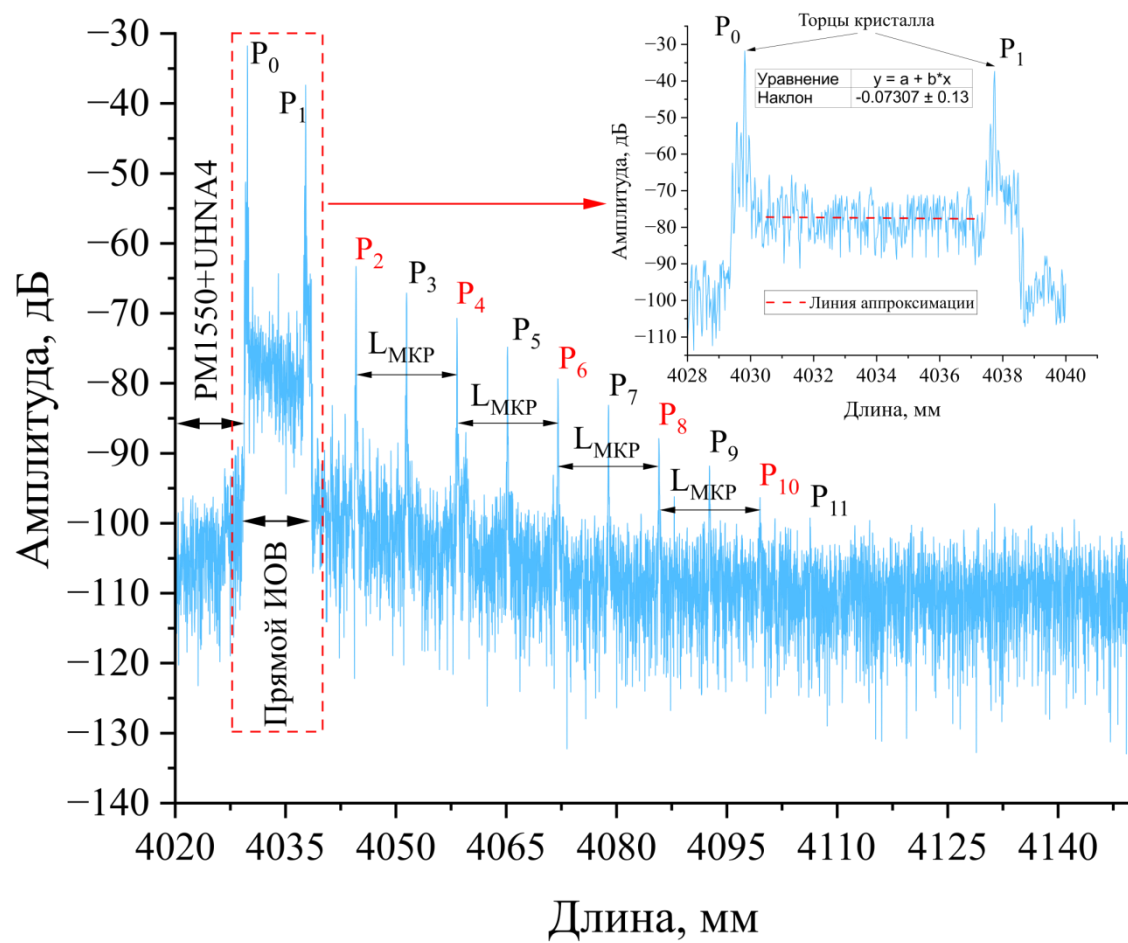


Рис. 17.

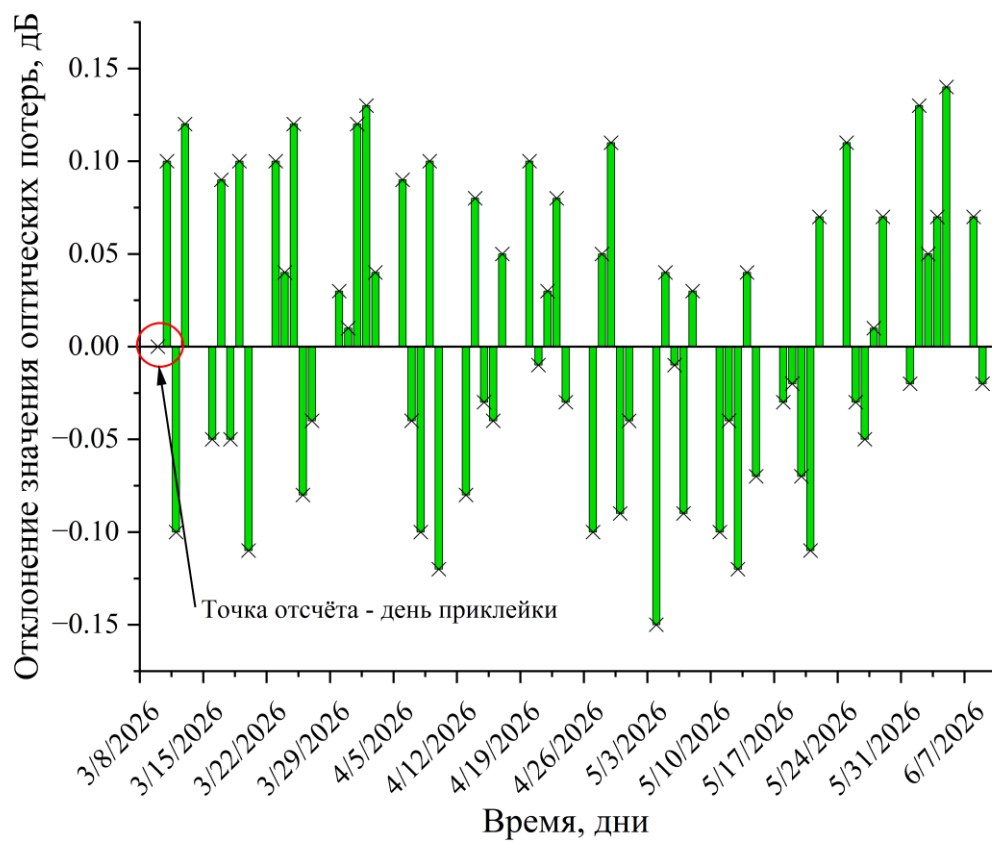


Рис. 18.