

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-06-78-86

УДК 535.93

Интегрально-оптические волноводы для квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм

Виктор Михайлович Петров¹, Михаил Владимирович Парфенов²,
Александр Викторович Тронеv³, Даниил Дмитриевич Решетников⁴✉,
Игорь Владимирович Ильичёв⁵

^{1, 4}Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 3, 5}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

¹vikpetroff@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>

²mvparfenov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>

³trone2008@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>

⁴d.d.reshetnikov@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>

⁵ivilichev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>

Аннотация

Предмет исследования. В статье исследовались оптические потери для волноводов, предназначенных для создания квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм. **Целью** данной работы является создание интегрально-оптических одномодовых волноводов для квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм с минимальными оптическими потерями. Отдельной задачей является оценка оптических потерь, допустимых для сохранения необходимой степени запутанности пары фотонов. **Метод.** Волноводы были изготовлены методом термической диффузии ионов титана в подложку, представляющую собой X-срез номинально-чистого ниобата лития LiNbO₃. Оценка оптических потерь производится путём экспериментального измерения уровня потерь на единицу длины волновода. Излучение вводилось и выводилось из волновода при помощи отрезков волокон, один конец которых был с разъемом, а другой — оканчивался простым сколом. Между сколом волокна и торцом волновода добавлялась капля иммерсионной жидкости. Измерения проводились для обоих типов поляризаций. **Основные результаты.** Были изготовлены шесть групп образцов. В каждой группе были образцы с шириной полосы $d = 3,0, 2,0$ и $1,5$ мкм. Представлены результаты измерения оптических потерь в изготовленных волноводах. Выяснено, что минимальными потерями обладают волноводы, изготовленные с шириной используемой полосы титана $d \approx 3$ мкм. По нашим оценкам, минимальные потери составили для поперечной магнитной поляризации примерно $0,20\text{--}0,25$ дБ/см, а для поперечной электрической поляризации — $0,1$ дБ/см. **Практическая значимость.** Изготовленные волноводы с шириной полосы $d \approx 3$ мкм потенциально могут быть использованы для создания квантовых фотонных гейтов в интегрально-оптическом исполнении. Выбранная длина волны 810 нм позволит уже в ближайшей перспективе приступить к разработке фотонных гейтов на основе предлагаемых волноводов, поскольку одним из наиболее доступных путей создания пар запутанных фотонов, с точки зрения эксперимента, является использование лазера на длине волны 405 нм с последующим удвоением длины волны при помощи нелинейного кристалла бета-бората бария.

Ключевые слова: интегрально-оптические волноводы, квантовые гейты, квантовая запутанность в волноводах с потерями, квантовые коммуникации

Благодарность: авторы выражают благодарность А.В. Шамраю за полезные советы и обсуждения, способствующие подготовке данной работы.

Ссылка для цитирования: Петров В.М., Парфенов М.В., Тронеv А.В., Решетников Д.Д., Ильичев И.В. Интегрально-оптические волноводы для квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 6. С. 78–86. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-78-86>

Коды OCIS: 250.4725; 270.5585; 230.3750; 230.3120.

Integrated optical waveguides for quantum photon gates at a wavelength of 810 nm

VICTOR M. PETROV¹, MIKHAIL V. PARFENOV², ALEXANDER V. TRONEV³,
DANIIL D. RESHETNIKOV⁴✉, IGOR V. IL'ICHEV⁵

^{1, 4}*Saint-Petersburg University, Saint-Petersburg, Russia*

^{2, 3, 5}*Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia*

¹*vikpetroff@mail.ru*

<https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>

²*mvparfenov@yandex.ru*

<https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>

³*trone2008@ya.ru*

<https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>

⁴*d.d.reshetnikov@gmail.com*

<https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>

⁵*ivilichev@gmail.com*

<https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>

Abstract

Subject of the study. The article investigated optical losses for waveguides designed to create quantum photon gates at a wavelength of 810 nm. **Aim of study.** Creation of integrated optical single-mode waveguides for quantum photon gates at a wavelength of 810 nm; estimation of optical losses acceptable to maintain the necessary degree of entanglement of a pair of photons. **Method.** The waveguides were manufactured by thermal diffusion of titanium ions into a substrate, which is an X-slice of nominally pure lithium niobate LiNbO₃. The optical loss is estimated by experimentally measuring the loss level per unit waveguide length. Optical radiation was coupled into and out of the waveguide using fiber segments, one end of which was with a connector, and the other ended with a simple cleaving. A drop of immersion liquid was added between the fiber cleavage and the end of the waveguide. Measurements were carried out for both polarizations. **Main results.** Six groups of samples were produced. In each group there were samples with strip widths $d = 3,0, 2,0$ and $1,5$ microns. The results of measuring optical losses in manufactured waveguides are presented. It was found out that waveguides made with the width of the titanium strip used $d \approx 3$ microns have minimal losses. According to our estimates, the minimum losses were approximately $0,20\text{--}0,25$ dB/cm for transverse magnetic polarization, and $0,1$ dB/cm for transverse electric polarization. **Practical significance.** Manufactured waveguides with a strip width of $d \approx 3$ microns can potentially be used to create quantum photonic gates in an integrated optical design. The chosen wavelength of 810 nm will allow us to start developing photonic gates based on the proposed waveguides in the near future, since one of the most accessible ways to create pairs of entangled photons, from the experimental point of view, is to use a laser at a wavelength of 405 nm, followed by doubling the wavelength using a nonlinear beta barium borate crystal.

Keywords: integrated optical waveguides, quantum gates, quantum entanglement in lossy waveguides, quantum communications

Acknowledgment: the authors express their gratitude to A.V. Shamray for useful advice and discussions that contribute to the preparation of this work.

For citation: Petrov V.M., Parfenov M.V., Tronev A.V., Reshetnikov D.D., Il'ichev I.V. Integrated optical waveguides for quantum photon gates at a wavelength of 810 nm [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 6. P. 78–86. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-78-86>

OCIS codes: 250.4725; 270.5585; 230.3750; 230.3120.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы устройства на основе интегрально-оптических волноводов приобретают всё более широкое применение в практических задачах информационной фотоники [1, 2]. Различные конфигурации волноводов и их режимы работы обеспечивают фазовую или амплитудную модуляцию оптического излучения на частотах до 20–30 ГГц с высокой эффективностью перекачки в боковые частоты [3], генерацию высших частотных гармоник, до ± 18 дискретных составляющих в полосе ± 32 ГГц [4], создание квантового широкополосного шума в полосе до 4,5 ГГц [5]. Особую роль интегрально-оптические модуляторы играют в системах квантовой рассылки ключа на боковых частотах [6]. Важно отметить, что, до последнего времени, такие модуляторы (как амплитудные, так и фазовые) были ориентированы на телекоммуникационный диапазон длин волн: 1520–1560 нм, что было связано с преимущественным развитием квантовых технологий именно для телекоммуникационного диапазона [7, 8]. В частности, такие волноводы могут быть изготовлены при помощи технологии трёхмерной фемтосекундной записи, что было продемонстрировано в работе [9].

Одной из актуальных задач современных квантовых технологий является создание квантовых фотонных гейтов в интегрально-оптическом исполнении [10–12]. Для работы таких гейтов должны быть использованы пары запутанных фотонов. Одним из наиболее доступных путей создания пар запутанных фотонов, с точки зрения эксперимента, является использование лазера на длине волны 405 нм с последующим удвоением длины волны при помощи кристалла бета-бората бария $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (ВВО).

Другими важными аргументами в пользу выбора рабочей длины волны гейта, равной 810 нм, по сравнению с использованием, например, рабочих длин волн из телекоммуникационного диапазона, являются следующие. Во-первых, использование более короткой длины волны позволяет увеличить плотность потока входных кубитов, над которыми производится преобразование, что в свою очередь экспоненциально увеличивает информационную ёмкость канала. Во-вторых, данная длина волны попадает в область чувствитель-

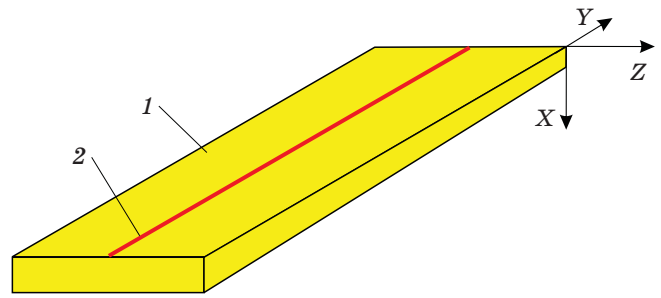


Рис. 1. Ориентация подложки 1 и волновода 2 относительно кристаллографических осей ниобата лития. Ось Z совпадает с оптической осью C кристалла C

Fig. 1. Orientation of the substrate 1 and waveguide 2 relative to the crystallographic axes of lithium niobate. The Z axis coincides with the optical axis C of the crystal

ности лучших однофотонных приёмников — тонкоплёночных однофотонных лавинных фотодиодов на основе кремния Si.

Одним из главных требований, предъявляемым в данном случае к волноводам, является минимальный уровень оптических потерь. Целью данной работы является создание интегрально-оптических одномодовых волноводов для квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм с минимальными оптическими потерями. Отдельной задачей является оценка оптических потерь, допустимых для сохранения необходимой степени запутанности пары фотонов.

В качестве материала подложки был выбран X-срез номинально чистого ниобата лития LiNbO_3 , волновод направлен вдоль оси Y (рис. 1). Выбор ниобата лития в качестве материала подложки обусловлен наличием в нём линейного электрооптического эффекта, что позволяет осуществлять электрическое управление условиями распространения оптического излучения по волноводу.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДОВ

Для изготовления волноводов была использована оригинальная и хорошо отработанная нами технология термической диффузии ионов титана с предварительным окислением и специальными мерами подавления обратной диффузии лития для диапазона длин волн 1520–1560 нм [13]. Главная задача

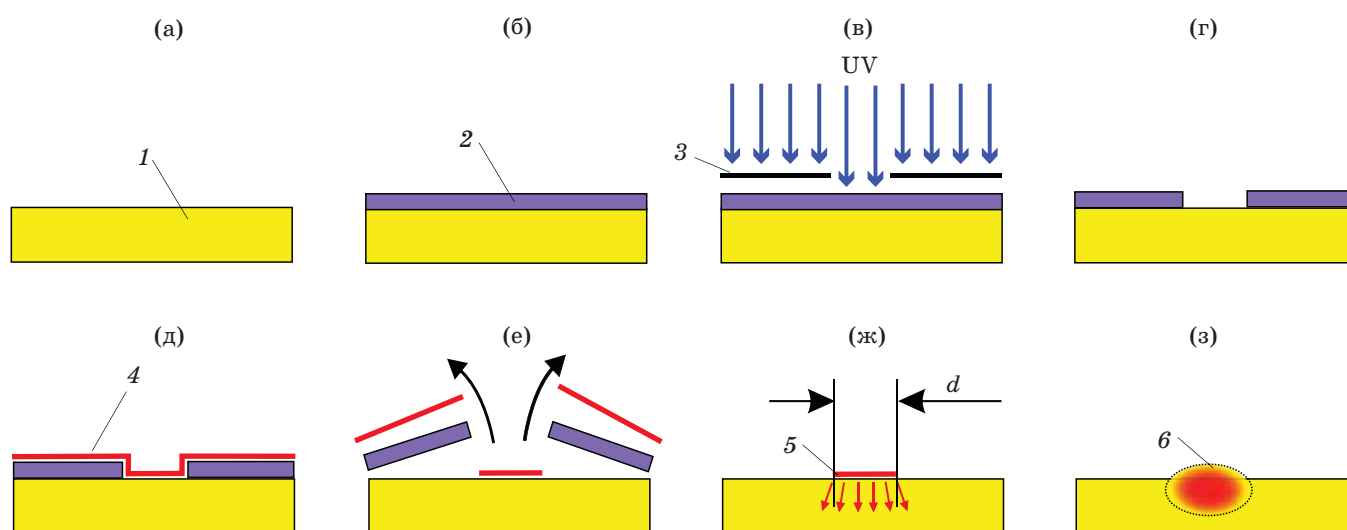


Рис. 2. Основные этапы изготовления волновода методом термической диффузии ионов титана Ti^{+} (поперечное сечение). 1 — подложка, 2 — слой фоторезиста, 3 — фотошаблон, 4 — слой титана Ti, 5 — полоска титана шириной d , 6 — волновод. (а) Подложка, (б) подложка, покрытая слоем фоторезиста, (в) экспонирование ультрафиолетовым излучением, (г) слой фоторезиста после промывки экспонированной области, (д) нанесение слоя титана, (е) удаление остаточных участков фоторезиста со слоем титана (англ.: «lift-off»), (ж) полоска титана на поверхности подложки, (з) волновод

Fig. 2. The main stages of manufacturing a waveguide by thermal diffusion of titanium ions Ti^{+} (cross section). 1 — substrate, 2 — photoresist layer, 3 — photomask, 4 — Ti titanium layer, 5 — d -width titanium strip, 6 — waveguide. (а) Substrate, (б) substrate coated with a layer of photoresist, (в) exposure to ultraviolet radiation, (г) photoresist layer after washing the exposed area, (д) application of a layer of titanium, (е) removal of residual areas of photoresist with a layer of titanium («lift-off»), (ж) a strip of titanium on the surface of the substrate, (з) waveguide

предварительных технологических этапов (рис. 2а–2е) — сформировать на поверхности подложки полоску титана шириной d (рис. 2ж). Толщина этой полоски во всех экспериментах составляла примерно 100 нм. После этого заготовка отжигалась при температуре 1021 °С в течение 8 часов. В результате процесса диффузии ионов титана в подложку формировался волновод (рис. 2з).

Были изготовлены шесть групп образцов. В каждой группе были образцы с шириной полоски $d = 3,0, 2,0$ и $1,5$ мкм. Ширина полоски d задавалась шириной щели на используемом фотошаблоне (рис. 2в). Как показывает наш опыт изготовления волнопроводов, именно ширина полоски титана d , расположенной на поверхности подложки, является основным параметром, определяющим в дальнейшем оптические свойства волновода.

Длина всех образцов L составляла 20 мм. Все остальные параметры образцов, в том числе и параметры изготовления (температура, время отжига) были одинаковыми.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Схема измерения оптических потерь волнопроводов показана на рис. 3.

Измерения проводились на длине волны 808,6 нм при помощи DFB-лазера с волоконным выходом через PM-(Polarization Maintaining)-волокна LightComm PMCONN-0-670-010-FC/APC-FC/APC. Ориентация оси PM-волокна выставлялась относительно плоскости кристалла подложки чипа при помощи вращающегося волоконного держателя 2. Выход лазера сопряжён с изолятором Optizone HPMI-80-C40-F-22-LL-1 на 30 дБ.

Излучение вводилось и выводилось из волновода при помощи отрезков волокон, один конец которых был с разъёмом, а другой — оканчивался простым сколом. Между сколом волокна и торцом волновода добавлялась капля иммерсионной жидкости. Таким образом, потери измерялись для конструкции, находящейся между разъёмами «А» и «Б». Измерения проводились для обеих ТМ (Transverse Magnetic)- и ТЕ (Transverse Electric)-поля-

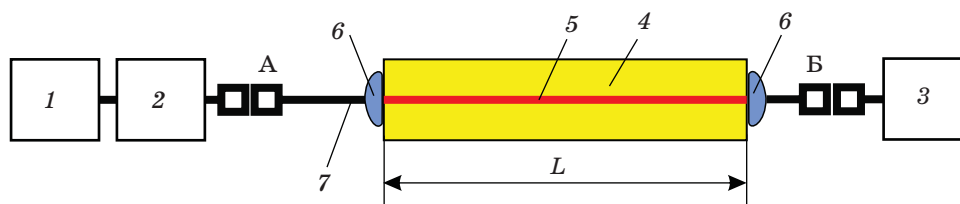


Рис. 3. Схема измерения оптических потерь в волноводах. 1 — лазер, 806,6 нм, 2 — вращатель волокна, 3 — фотоприёмник, 4 — подложка, 5 — волновод, 6 — капли иммерсионной жидкости, 7 — оптические волокна с разъёмами А и Б

Fig. 3. A scheme for measuring optical losses in waveguides. 1 — laser, 806.6 nm, 2 — fiber rotator, 3 — photodetector, 4 — substrate, 5 — waveguide, 6 — immersion liquid droplets, 7 — optical fibers with connectors A and B

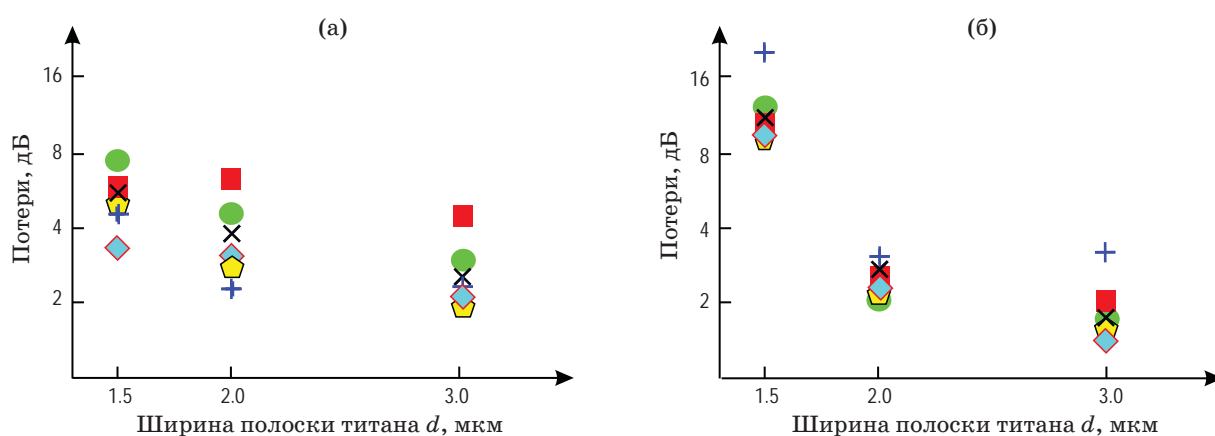


Рис. 4. Результаты измерения оптических потерь в волноводах. (а) ТМ-поляризация, (б) ТЕ-поляризация. Разные значки обозначают разные группы образцов волнопроводов. Данные приведены для измерений от разъёма «А» до разъёма «Б»

Fig. 4. Results of measurement of optical losses in waveguides. (а) TM polarization, (б) TE polarization. Different icons indicate different groups of waveguide samples. The data are given for measurements from connector «А» to connector «Б»

ризации. Величина потерь определялась как $10 \text{Lg}(P_{\text{in}} / P_{\text{out}})$.

На рис. 4 приведены результаты измерения оптических потерь в изготовленных нами волноводах. Каждая группа образцов волнопроводов имеет своё обозначение (кружок, квадрат, крестик и т.д.). Заметный разброс значений потерь волнопроводов для одних и тех же значений d может быть вызван ограниченностью разрешения использованной фотолитографии (т.е. дефектами волнопроводов), а также интерференцией мод, возбуждаемых в двухмодовых волноводах.

Как видно из рис. 4, наименьшими потерями обладают волноводы, образованные полоской титана шириной 3 мкм. Для горизонтальной (ТЕ) поляризации они составили минимум 1,7 дБ, для вертикальной (ТМ) — по-

тери составили порядка 2 дБ от разъёма «А» до разъёма «Б». Явно заметна поляризационная экстинкция на волноводах, образованных полоской 1,5 мкм, на ТМ-поляризации волноводы обладают существенно большими потерями. Высокий разброс значений на узких волноводах может быть вызван дефектностью формы полосок (особенно 1,5 мкм) из-за ограниченности разрешения используемой нами фотолитографии.

Согласно нашим экспериментальным данным, полученным для волнопроводов, изготовленных по аналогичной технологии, но для диапазона длин волн 1520–1560 нм, характерные потери на ввод излучения из волокна в волновод и на вывод из волновода в волокно составляют 0,7–0,8 дБ на каждый стык. Отсюда можно сделать вывод о том, что на длине волны 810 нм

погонные потери составляют порядка 0,1 дБ/см, что вполне сопоставимо с погонными потерями для волноводов, работающих в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

МODOVЫЕ СВОЙСТВА ВОЛНОВОДОВ

Был также проведён анализ образцов на одномодовость. Фотографии мод, полученные с помощью инфракрасной камеры показаны на рис. 5. Использованная оптическая система не была предназначена для съёмки мод с малым поперечным размером на длине волны 800 нм, что не позволило измерить характерный поперечный размер моды, но позволила качественно оценить возможность возбуждения в волноводах высших мод. Эксперимент состоял в следующем. Сначала излучение вводится в центр волновода. На выходе наблюдается распределение интенсивности фундамен-

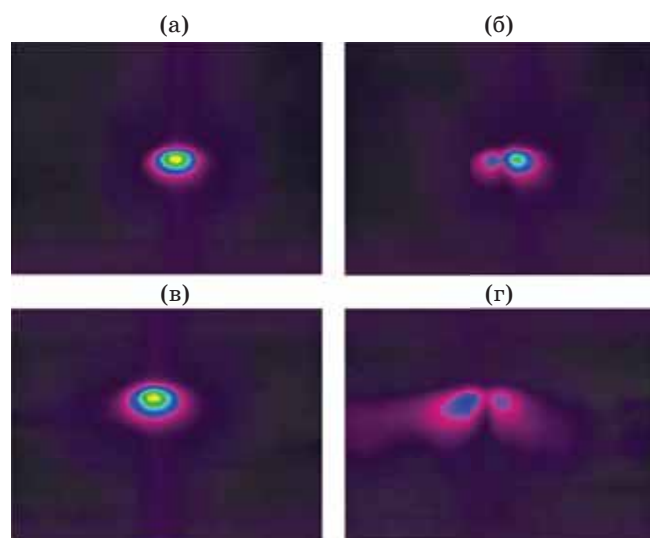


Рис. 5. Примеры распределения интенсивностей излучения на выходе волновода. (а) ТМ-поляризация, $d = 3$ мкм, фундаментальная мода, (б) ТМ-поляризации, $d = 3$ мкм, высшие моды, (в) ТЕ-поляризация, $d = 2$ мкм, фундаментальная мода, (г) ТЕ-поляризации, $d = 2$ мкм, высшие моды

Fig. 5. Examples of the distribution of optical radiation intensities at the waveguide output for (а) ТМ-polarization, $d = 3$ microns, fundamental mode, (б) ТМ-polarization, $d = 3$ microns, higher modes, (в) ТЕ-polarization, $d = 2$ microns, fundamental mode, (г) ТЕ-polarization, $d = 2$ microns, higher modes

Результаты анализа модовых свойств волноводов
Results of the analysis of the mode properties of waveguides

Поляриза- ция\ширина полоски d	$d = 1,5$ мкм	$d = 2$ мкм	$d = 3$ мкм
ТЕ	–	+	+
ТМ	–	–	+

тальной моды. Затем излучение перемещается к краю волновода. Если волновод одномодовый — то в этом случае на выходе наблюдается уменьшение интенсивности фундаментальной моды вплоть до нуля. Изменение формы не происходит. Если же волновод двухмодовый, то при перемещении к краю волновода наблюдается изменение формы распределения, как это показано на рис. 5 справа.

Было выяснено, что граница одномодовости изготовленных образцов проходит по ширине полоски примерно 2 мкм. Образцы на основе полоски шириной 3 мкм являются двухмодовыми. Результаты анализа модовых свойств волноводов приведены в таблице. Знаком + отмечена двухмодовость.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из приведённых экспериментальных данных, минимальными потерями обладают волноводы, изготовленные с шириной используемой полоски титана $d \approx 3$ мкм. По нашим оценкам, минимальные потери составили для ТМ-поляризации примерно 0,20–0,25 дБ/см, а для ТЕ-поляризации — 0,1 дБ/см. Однако, следует учесть, что такие волноводы — двухмодовые.

Вопрос влияния потерь на степень запутанности пар фотонов при прохождении через гейт является одним из главных [2]. В работах [14, 15] показано, что для гейтов, изготовленных в ниобате лития, уровень допустимой скорости распада $\gamma/J \leq 0,143-0,05$. Здесь J — параметр связи между двумя волноводами, которые образуют делитель в виде X-каплера, γ — величина потерь в частотных единицах c^{-1} , которая определяется из соотношения:

$$10Lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \equiv 10Lg(e^{-2\gamma/c}),$$

где P_{in} — мощность на входе, P_{out} — мощность после прохождения единицы длины, c — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме в свободном пространстве. При величинах скорости распада γ/J мод в волноводе из указанного диапазона пары фотонов оказываются достаточно устойчивыми к декогеренции, чтобы производить над ними логические преобразования в интегрально-оптическом гейте.

Оценки показывают, что для наших экспериментальных данных критерий $\gamma/J \leq 0,162–0,061$. Таким образом, достигнутые потери потенциально позволяют использовать созданные нами волноводы для квантовых фотонных гейтов. Полезно отметить, что, например, оценки параметра γ/J для AlGaAs и кварца дают соответственно 0,1 и 0,05 [14].

Потери в оптических волноводах неизбежны из-за поглощения материала и рассеяния, вызванного дефектами и неоднородностью поверхностей. В традиционных оптических системах это приводит к снижению интенсивности сигнала, и, как следствие, к необходимости использования повторителей и усилителей сигнала в волноводном канале связи. Однако в квантово-оптическом случае процессы потерь (затухания амплитуды) наряду с процессами случайного изменения фазы (затухания фазы) приводят к уменьшению длины когерентности фотонов, что влияет на рост числа ошибок в квантовых вычислениях [15] и каналах связи. Рост числа ошибок в вычислительных схемах приводит к необходимости использования кодов коррекции, работающих быстрее, чем время когерентности фотонных кубитов, а также к многократному повторению операций

для увеличения точности, что снижает производительность квантовых операций. В свою очередь, ошибки в квантовых каналах связи криптографических систем снижают уровень защищённости таких каналов и делают их более уязвимыми к атакам с разделением числа фотонов [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированные в данной работе величины погонных потерь оптических волноводов в ниобате лития для длины волны 810 нм, особенно для ТЕ-поляризации, сопоставимы с потерями для волноводов, разработанных для диапазона длин волн 1520–1560 нм и, вероятно, являются близкими к предельно-достижимым для данного материала. В обоих случаях используется одна и та же технология изготовления — метод термической диффузии ионов титана Ti^{+} . Выяснено, что минимальными потерями обладают волноводы, изготовленные с шириной используемой полоски титана $d \approx 3$ мкм. Для ТМ-поляризации минимальные потери составили примерно 0,20–0,25 дБ/см, а для ТЕ-поляризации — 0,1 дБ/см. Изготовленные волноводы с шириной полоски 3 мкм потенциально могут быть использованы для создания квантовых фотонных гейтов на длине волны 810 нм в интегрально-оптическом исполнении, поскольку одним из наиболее доступных путей создания пар запутанных фотонов, с точки зрения эксперимента, является использование лазера на длине волны 405 нм с последующим удвоением длины волны при помощи нелинейного кристалла бета-бората бария.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров В.М., Агрозов П.М., Лебедев В.В., Ильичёв И.В., Шамрай А.В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. Вып. 7. С. 760–782. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038871>
2. Skryabin N.N., Kondratyev I.V., Dyakonov I.V., Borzenkova O.V., Kulik S.P. Straupe S.S. Two-qubit quantum photonic processor manufactured by femtosecond laser writing // Appl. Phys. Letters. 2023. V. 122. P. 121102. <https://doi.org/10.1063/5.0137728>
3. Петров В.М., Шамрай А.В., Ильичёв И.В., Агрозов П.М., Лебедев В.В., Герасименко Н.Д., Герасименко В.С. Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций // Фотоника. 2020. Т. 14. № 5. С. 414–422. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423>

REFERENCES

1. Petrov V.M., Agruzov P.M., Lebedev V.V., Il'ichev I.V., Shamray A.V. Broadband integrated optical modulators: achievements and prospects // Phys.-Usp. 2021. V. 64. Iss. 7. P. 722. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038871>
2. Skryabin N.N., Kondratyev I.V., Dyakonov I.V., Borzenkova O.V., Kulik S.P. Straupe S.S. Two-qubit quantum photonic processor manufactured by femtosecond laser writing // Appl. Phys. Letters. 2023. V. 122. P. 121102. <https://doi.org/10.1063/5.0137728>
3. Petrov V.M., Shamrai A.V., Il'ichev I.V., Agruzov P.M., Lebedev V.V., Gerasimenko N.D., Gerasimenko V.S. National microwave integrated optical modulators for quantum communications // Photonics Russia. 2020. V. 14 Iss. 5. P. 414–423. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423>

4. Петров В.М., Шамрай А.В., Ильичёв И.В., Агрозов П.М., Лебедев В.В., Герасименко Н.Д., Герасименко В.С. Генерация оптических частотных гармоник для квантовых коммуникаций на боковых частотах // Фотоника. 2020. Т. 14. № 7. С. 570–582. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.570.582>
5. Vashukevich E.A., Lebedev V.V., Ilichev I.V., Agruzov P.M., Shamrai A.V., Petrov V.M., Golubeva T.Yu. Broadband chip-based source of quantum noise with electrically controllable beam splitter // Phys. Rev. Applied. 2022. V. 17. № 6. P. 064039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.064039>
6. Gerasimenko N.D., Gerasimenko V.S., Petrov V.M. Generation of frequency harmonics for QKD systems at subcarrier waves // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1984. № 1. P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1984/1/012010>
7. Глейм А.В., Чистяков В.В., Банник О.И., Егоров В.И., Булдаков Н.В., Васильев А.Б., Гайдаш А.А., Козубов А.В., Смирнов С.В., Кынев С.М., Хоружников С.Э., Козлов С.А., Васильев В.Н. Квантовая коммуникация на боковых частотах со скоростью 1 Мбит/с в городской сети // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 6. С. 3–9.
8. Zhang M., Wang C., Kharel P., Zhu D., Lončar M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability // Optica. 2021. V. 8. Iss. 5. P. 652–667. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.415762>
9. Skryabin N., Bukharin M., Kostritskii S.M., Korkishko Yu., Fedorov V., Khudyakov D. Technology of three-dimensional femtosecond writing for creating integrated optics elements // Radio Industry. 2018. P. 110–117. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2018-1-110-117>
10. Aguayo-Alvarado A.L., Acevedo-Carrera A., Domínguez-Serna F.A., De La Cruz W., Garay-Palmett K. A proposal for nonlinear — optics based quantum gates in integrated photonic circuits. Frontiers in Optics // Laser Science. OSA Technical Digest. 2020. Paper FM4A.8. <https://doi.org/10.1364/FIO.2020.FM4A.8>
11. Mandal M., Mukhopadhyay S. Photonic scheme for implementing quantum square root controlled z gate using phase and intensity encoding of light // IET Optoelectron. 2021. V. 15. Iss. 1. P. 52–60. <https://doi.org/10.1049/ote2.12008>
12. Петров В.М., Коротеев Д.А., Семисалов Д.А., Страшилин С., Хлусевич Д.С., Яковлев М.И., Парфенов М.В. Интегрально-оптические C-NOT гейты: оценка основных параметров для практической реализации // Фотоника. 2023. Вып. 1. Стр. 58–71. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.58.70>
13. Лебедев В.В., Ильичёв И.В., Агрозов П.М., Тронев А.В., Шамрай А.В. Оптический модулятор // Патент РФ № 187990 U1. 2019.
14. Rai A., Das S., Agrawal G.S. Quantum entanglement in coupled lossy waveguides // Optics Express. 2010. V. 18. № 6. P. 6241–6254. <https://doi.org/10.1364/OE.18.006241>
15. Chuang I.L., Laflamme R., Paz J.-P. Effects of loss and decoherence on a simple quantum computer // arXiv:quant-ph/9602018v1
16. Yang S., Liu W., Han Y., Yang B. Effects of loss and dispersion on fiber-based quantum key distribution system // Proc. SPIE 7136. Optical Transmission, Switching, and Subsystems VI. 11 November 2008. P. 71360B. <https://doi.org/10.1117/12.804060>
4. Petrov V.M., Shamray A.V., Ilichev I.V., Gerasimenko N.D., Gerasimenko V.S., Agruzov P.M., Lebedev V.V. Generation of optical frequency harmonics for quantum communication systems at side frequencies // Photonics Russia. 2020. V. 14. Iss. 7. P. 570–582. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.570.582>
5. Vashukevich E.A., Lebedev V.V., Ilichev I.V., Agruzov P.M., Shamrai A.V., Petrov V.M., Golubeva T.Yu. Broadband chip-based source of quantum noise with electrically controllable beam splitter // Phys. Rev. Applied. 2022. V. 17. № 6. P. 064039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.064039>
6. Gerasimenko N.D., Gerasimenko V.S., Petrov V.M. Generation of frequency harmonics for QKD systems at subcarrier waves // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1984. № 1. P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1984/1/012010>
7. Gleim A.V., Chistyakov V.V., Bannik O.I. et al. Sideband quantum communication at 1 Mbit/s on a metropolitan area network // Journal of Optical Technology. 2017. V. 84. P. 362–367. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000362>
8. Zhang M., Wang C., Kharel P., Zhu D., Lončar M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability // Optica. 2021. V. 8. Iss. 5. P. 652–667. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.415762>
9. Skryabin N., Bukharin M., Kostritskii S.M., Korkishko Yu., Fedorov V., Khudyakov D. Technology of three-dimensional femtosecond writing for creating integrated optics elements // Radio Industry. 2018. P. 110–117. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2018-1-110-117>
10. Aguayo-Alvarado A.L., Acevedo-Carrera A., Domínguez-Serna F.A., De La Cruz W., Garay-Palmett K. A proposal for nonlinear — optics based quantum gates in integrated photonic circuits. Frontiers in Optics // Laser Science. OSA Technical Digest. 2020. Paper FM4A.8. <https://doi.org/10.1364/FIO.2020.FM4A.8>
11. Mandal M., Mukhopadhyay S. Photonic scheme for implementing quantum square root controlled z gate using phase and intensity encoding of light // IET Optoelectron. 2021. V. 15. Iss. 1. P. 52–60. <https://doi.org/10.1049/ote2.12008>
12. Petrov V.M., Koroteev D.A., Semisalov D.A., Strashilin V.S., Khlusevich D.S., Yakovlev M.I., Parfenov M.V. Integrated optical C-NOT gates: Estimation of the main parameters for practical design // Photonics Russia. 2023. V. 17. Iss. 1. P. 58–71. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.58.70>
13. Lebedev V.V., Ilichev I.V., Agruzov P.M., Tronev A.V., Shamray A.V. Optical modulator // RF Patent No. 187990 U1. 2019.
14. Rai A., Das S., Agrawal G.S. Quantum entanglement in coupled lossy waveguides // Optics Express. 2010. V. 18. № 6. P. 6241–6254. <https://doi.org/10.1364/OE.18.006241>
15. Chuang I.L., Laflamme R., Paz J.-P. Effects of loss and decoherence on a simple quantum computer // arXiv:quant-ph/9602018v1
16. Yang S., Liu W., Han Y., Yang B. Effects of loss and dispersion on fiber-based quantum key distribution system // Proc. SPIE 7136. Optical Transmission, Switching, and Subsystems VI. 11 November 2008. P. 71360B. <https://doi.org/10.1117/12.804060>

АВТОРЫ

Виктор Михайлович Петров — доктор физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 24773525500, <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>, vikpetroff@mail.ru

Михаил Владимирович Парфенов — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>, mvparfenov@yandex.com

Александр Викторович Тронеv — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56663299200, <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>, trone2008@ya.ru

Даниил Дмитриевич Решетников — аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>, d.d.reshetnikov@gmail.com

Игорь Владимирович Ильичёв — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>, ivilichev@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 19.06.2023
Одобрена после рецензирования 22.12.2023
Принята к печати 29.04.2024*

AUTHORS

Victor M. Petrov — D.Sci. in Physics and Mathematics, Full Professor, Saint-Petersburg University, 199034, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 24773525500, <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>, vikpetroff@mail.ru

Mikhail V. Parfenov — Research fellow, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>, mvparfenov@yandex.com

Alexander V. Tronev — PhD in Physics and Mathematics, Research fellow, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56663299200, <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>, trone2008@ya.ru

Daniil D. Reshetnikov — Student, Saint-Petersburg University, 199034, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>, d.d.reshetnikov@gmail.com

Igor V. Il'ichev — PhD in Chemistry, Senior Research Fellow, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>, ivilichev@gmail.com

*The article was submitted to the editorial office 19.06.2023
Approved after review 22.12.2023
Accepted for publication 29.04.2024*