

Исследование направленных ответвителей для реализации квантовых операций над кубитами

© И.О. Венедиктов,^{1,2} В.В. Ковалюк,^{1,3} П.П. Ан,^{2,3} А.Д. Голиков,² С.С. Святодух,^{1,2} Г.Н. Гольцман^{1,4}

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 109028 Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, 119991 Москва, Россия

³ Университет науки и технологий МИСИС, 119049 Москва, Россия

⁴ Российский квантовый центр, 121205 Москва, Россия
e-mail: ilia1999ven@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 мая 2023 г.

Принято к публикации 3 мая 2023 г.

Исследованы нанوفотонные схемы с направленными ответвителями, которые, наряду с фазовращателями, являются одними из основных элементов для создания схем линейного оптического квантового компьютера. Направленные ответвители, представляющие из себя два близко расположенных волновода, были изготовлены из нитрида кремния. Предметом исследования являлся коэффициент деления направленных ответвителей на длине волны 914 nm при комнатной (300 K) и гелиевой (3 K) температурах. На основе экспериментальных данных была извлечена длина связи, при которой вся мощность из одного волновода переходит в другой, и найдены показатели преломления нитрида кремния при комнатной (300 K) и гелиевой (3 K) температурах. Результаты имеют важное значение при проектировании и изготовлении полностью интегральных квантово-оптических микросхем со сверхпроводниковыми детекторами, работающими при гелиевых температурах.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, направленный ответвитель, нитрид кремния, квантово-оптические интегральные микросхемы, масштабируемый квантовый компьютер на фотонах.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55755.80-23

Введение

Квантовый компьютер способен значительно быстрее решать определенные классы задач, которые имеют приложение в криптографии, анализе молекул, математической обработке данных [1]. Существует несколько подходов к реализации квантового компьютера, отличающиеся физической реализацией кубитов. В качестве кубитов могут быть использованы различные физические объекты, находящиеся в суперпозиции двух ортогональных состояний. Наряду со сверхпроводниковыми цепями, захваченными ионами и атомами, одним из наиболее перспективным способом реализации кубитов является использование фотонов [1]. Фотоны имеют ряд преимуществ перед другими платформами, включая множество степеней свободы для кодирования (частота, фаза, поляризация, угловой момент, пространственное распределение между волноводами), легкость реализации пассивных гейтов, высокую стабильность квантового состояния без взаимодействия с веществом [2]. В интегрально-оптическом исполнении квантового компьютера квантовые гейты могут быть реализованы в виде светоделителей и фазовращателей [3], а детектирование фотонов — при помощи однофотонных детекторов [4]. Наиболее перспективными детекторами, обладающими рекордны-

ми характеристиками в оптическом и телекоммуникационном диапазоне длин волн, являются сверхпроводниковые однофотонные детекторы (Superconducting Single Photon Detectors, SSPDs), изобретенные в России в 2001 г. [5]. Наряду с высокой эффективностью детектирования ($> 85\%$), низкой скоростью темновых отсчетов (< 10 Hz), высоким временным разрешением (< 50 ps) уже сегодня такие детекторы интегрированы с различными фотонными платформами, включая SOI [6], GaAs [7], Si₃N₄ [8], поликристаллический алмаз [9], LNOI [10]. Так как SSPDs работают при криогенных температурах, то при конструировании делителей и фазовращателей важно учитывать температурную зависимость показателя преломления как волноводного материала (core), так и окружения (cladding). Одной из наиболее простых схем светоделения является направленный ответвитель. Это устройство представляет из себя два волновода, сведенных на близкое расстояние (порядка длины волны излучения). За счет эванесцентной волны (ближнего поля) происходит перетекание мощности из одного волновода в другой. Коэффициент деления зависит от длины взаимодействия волноводов (L_i), на которой волноводы сведены достаточно близко друг к другу, от расстояния между волноводами (L_g), от показателей преломления материала волноводов (сердцевины и окружения), а так-

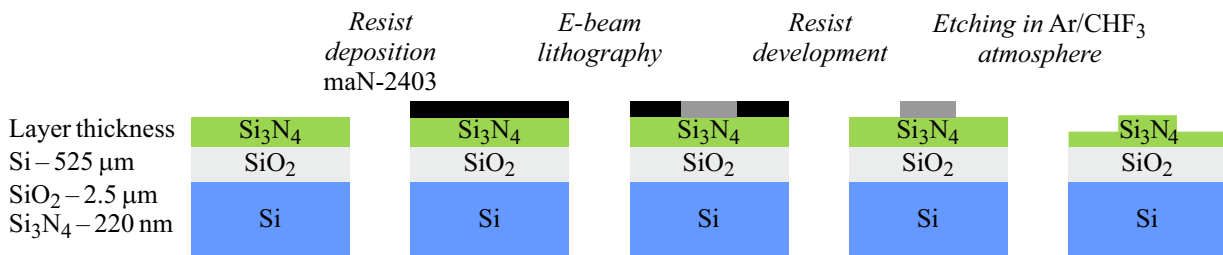


Рис. 1. Схема технологического маршрута, включающего в себя следующие основные этапы: нанесение резиста maN-2403, электронную литографию, проявление резиста, плазмохимическое травление в атмосфере Ar/CHF₃.

же от среды между ними. При понижении температуры могут меняться как геометрические параметры структуры (за счет коэффициента линейного расширения), так и показатели преломления материалов, входящих в состав структуры. Подобные изменения могут сильно изменить коэффициент деления. В работе [11] показана зависимость коэффициента деления направленных ответвителей из Si₃N₄ от расстояния между волноводами, данная зависимость является экспоненциальной, поэтому даже небольшое изменение геометрии волноводов будет приводить к большому изменению коэффициента деления. Помимо этого в работе [11] приведена зависимость пропускания в одном из портов ответвителей от длины волны, из которой видно, что длина волны также существенно влияет на коэффициент деления, что говорит о сильной зависимости коэффициента деления от показателя преломления материала волноводов. Говоря о температурной зависимости показателя преломления Si₃N₄, в большинстве работ показано изменение показателя преломления Si₃N₄ при температурах выше 300 К. Так, в работе [12] показана зависимость коэффициента деления для изогнутых направленных ответвителей в диапазоне температур от 287 до 363 К, за счет геометрии и использования LPCVD Si₃N₄ авторам удалось добиться снижения температурной зависимости коэффициента деления на 85% по сравнению со структурами из кремния, а также уменьшить влияние длины волны на коэффициент деления. В настоящей работе мы изучали изменение коэффициента деления направленного ответвителя в зависимости от длины взаимодействия при комнатной (300 К) и гелиевой (3 К) температурах на длине волны 914 nm

1. Технологический маршрут изготовления устройства

Для изготовления нанопотонных устройств использовались коммерчески доступные пластины из стехиометрического LPCVD (Low pressure chemical vapor deposition) нитрида кремния. Толщина кремниевой подложки составляла 545 μm, термического оксида SiO₂ 2.5 μm и Si₃N₄ — 225 nm. На первом этапе изготовления методом центрифугирования было выполнено

нанесение негативного резиста (maN-2403), при котором за 60 s и 3400 r/s формировалась толщина резиста, равная 300 nm. После этого происходила сушка резиста при температуре 90°C в течение 2 min, и выполнялась электронная литография на CABL 9050C (ЦКП МФТИ) с ускоряющим напряжением 50 kV, током пучка 150 pA и дозой 80 μC/cm². Затем происходило проявление резиста в MF-319 на протяжении 60 s. На втором этапе выполнялось плазмохимическое травление на установке Corial 200R в атмосфере рабочих газов: Ar и CHF₃. Скорость травления составляла около 1 nm/s, контролировалась встроенным в установку рефлектометром, а само травление выполнялось на половину толщины нитрида кремния. Завершал процесс изготовления этап удаления электронного резиста в растворе N-метил-2-пирролидон (NMP). Схема технологического маршрута изготовления показана на рис. 1.

2. Описание устройства

Типичное устройство состояло из двух близко расположенных волноводов, каждый соединенный с двумя фокусирующими дифракционными решетками (Focusing Grating Couplers, FGC), оптимизированными на длину волны $\lambda = 925$ nm (рис. 1). Длина волны выбиралась для возможности последующей интеграции с детектором и направленным ответвителем однофотонного источника из квантовой точки на основе GaAs [13]. Волноводы направленного ответвителя были на расстоянии 0.5 μm (зазор) на длине L_i („участок взаимодействия“ на рис. 2), при которых за счет эванесцентного поля происходило перетекание оптической мощности из одного волновода в другой. Длина участка взаимодействия от структуры к структуре варьировалась от 16 до 100 μm с шагом 6 μm.

3. Моделирование направленных ответвителей

Для определения длины взаимодействия, на которой происходит полное перетекание оптической мощности из одного волновода в другой, нами было выполнено моделирование распределения E_x

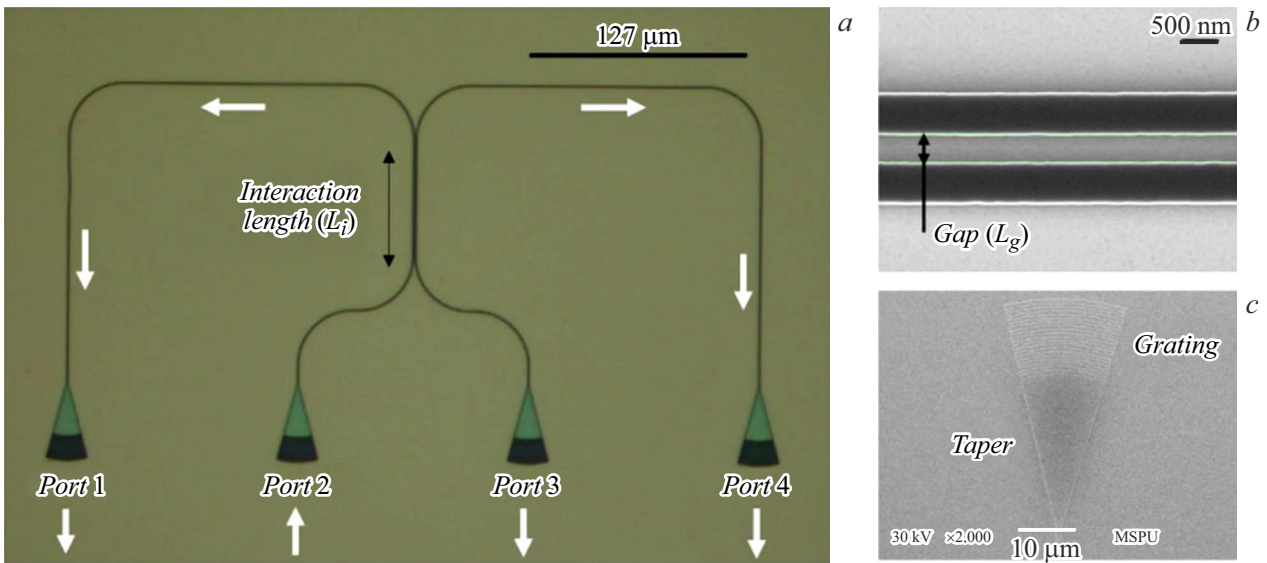


Рис. 2. Микрофотография направленного ответвителя, включающего в себя: *a* — общий вид структуры, *b* — увеличенное изображение центральной части направленного ответвителя, полученное в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), *c* — увеличенное изображение фокусирующей дифракционной решетки, полученное в СЭМ.

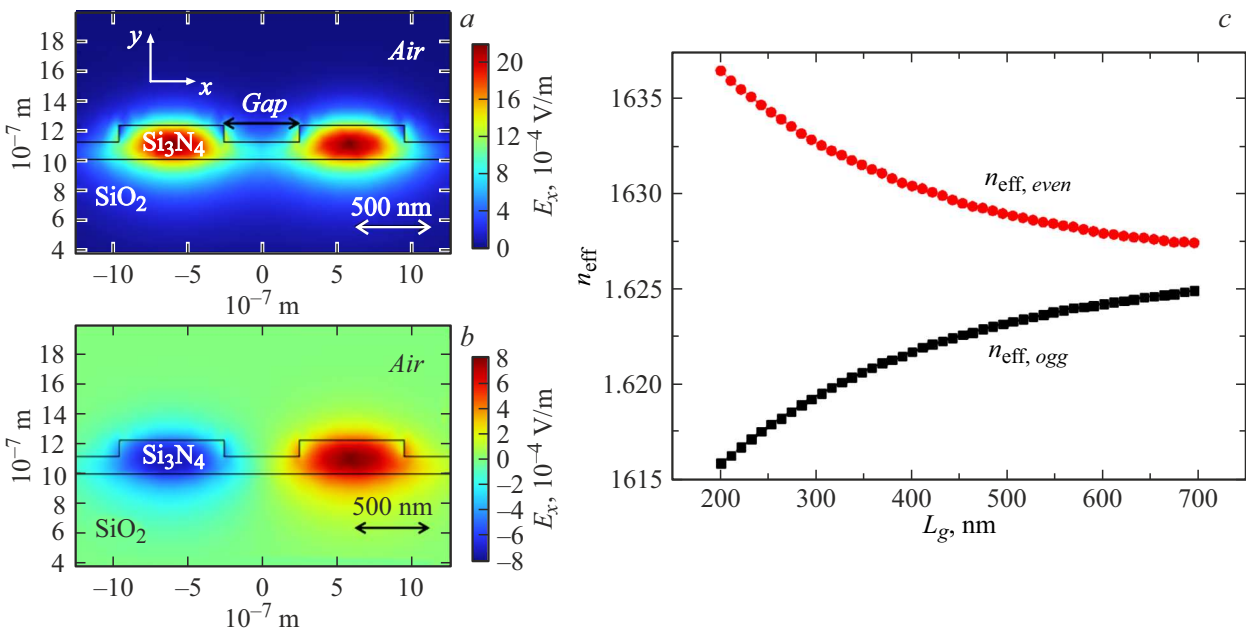


Рис. 3. Распределение электрического поля E_x в поперечном сечении направленного ответвителя: *a* — для четной моды, *b* — для нечетной моды направленного ответвителя, *c* — зависимость эффективного показателя преломления для четной (красные точки (в онлайн версии)) и нечетной (черные точки) мод от расстояния между волноводами на $\lambda = 914$ nm и глубины травления $h_e = 110$ nm.

компоненты электромагнитного поля в поперечном сечении волноводов (рис. 3, *a, b*). В численной модели использовались значения для показателя преломления [14,15] $n(\text{SiO}_2, 300\text{K}) = 1.4516$, $n(\text{Si}_3\text{N}_4, 300\text{K}) = 1.9908$, $n(\text{air}) = 1$, для оксида кремния, нитрида кремния и воздуха соответственно. Из симуляции были получены значения $n_{eff, odd}$ и $n_{eff, even}$ для двух мод распространяющихся в волноводах: нечет-

ной и четной соответственно. После этого была рассчитана зависимость $n_{eff, odd}$ и $n_{eff, even}$ от расстояния между волноводами (рис. 3, *c*) и глубины травления. По полученным значениям эффективного показателя преломления была найдена длина связи (L_C), показывающая при какой длине взаимодействия волноводов происходит полное перетекание мощности из одного в другой.

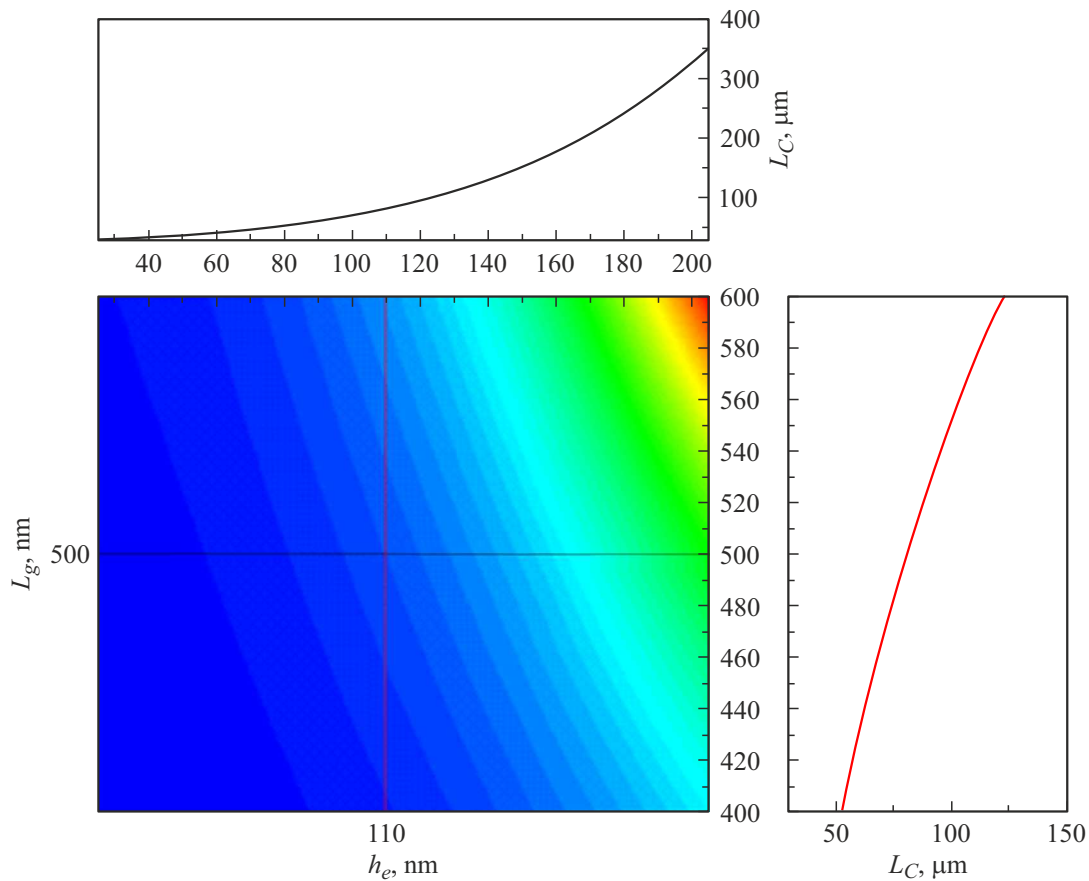


Рис. 4. Зависимость длины связи (L_C) на длине волны $\lambda = 914 \text{ nm}$ от расстояния между волноводами (L_g) и глубины травления (h_e), найденная по результатам численного моделирования четной и нечетной моды направленного ответвителя и формулы (1).

Расчет длины связи (L_C) был произведен по формуле

$$L_C = \lambda / (2|n_{\text{eff,odd}} - n_{\text{eff,even}}|), \quad (1)$$

где λ — длина волны в вакууме. На рис. 4 представлена зависимость длины связи от глубины травления волноводов и расстояния между волноводами. L_C увеличивается с ростом расстояния между волноводами и глубины травления, что можно объяснить увеличением области между волноводами с меньшим показателем преломления, что замедляет перетекание мощности. Для глубины травления 110 nm и расстояния между волноводами 500 nm длина связи составила $L_C = 80.18 \text{ }\mu\text{m}$.

4. Методика измерений и результаты

На первом этапе эксперимента чип с готовыми устройствами располагался на столике с пьезопозиционерами, который обеспечивал перемещение по направлениям x , y , z , и вращение в плоскости xy . Столик служил для выравнивания массива волокон относительно фокусирующих решеток на чипе, а элемент Пельтье с PID-контроллером стабилизировал температуру чипа при комнатной температуре. Ввод и вывод излучения

происходил при помощи массива волокон, расположенного над нанопотонным чипом под углом 8° к нормали. При измерениях излучение вводилось в порт 2 (рис. 1), и измерялась оптическая мощность, выходящая из остальных портов. Порты 1 и 4 использовались для измерения непосредственно коэффициента деления, а значение мощности из порта 3 — для оценки отражения от направленного ответвителя, которые составили около 4–5% от суммарной выходной оптической мощности. На втором этапе изготовленные структуры были измерены при температуре 3 К в оригинальной установке на основе машины замкнутого цикла SRDK-101D с использованием криогенных подвижек AttoCube. Схема установки представлена на рис. 5.

Результаты измерений коэффициента, рассчитанных по формуле (2) деления для двух этапов измерений представлены на рис. 6, где красные (в онлайн версии) и черные точки — измеренные значения коэффициента деления при комнатной и гелиевой температуре соответственно, а сплошными линиями показан результат аппроксимации косинусоидальной зависимостью

$$k = P_1 / (P_1 + P_4), \quad (2)$$

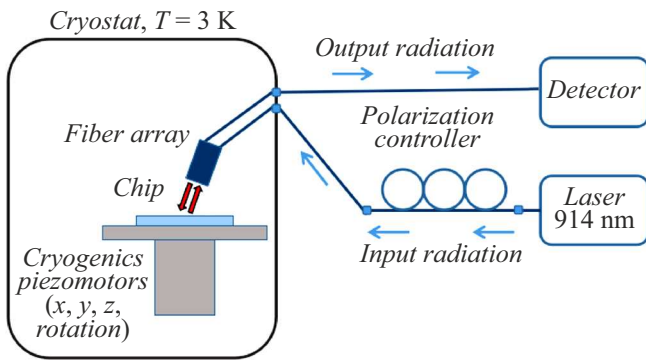


Рис. 5. Схема экспериментальной установки, включающей в себя криостат, криогенные пьезоподвижки, массив волокон, лазерный источник $\lambda = 914\text{ nm}$, контроллер поляризации и быстрый фотодетектор.

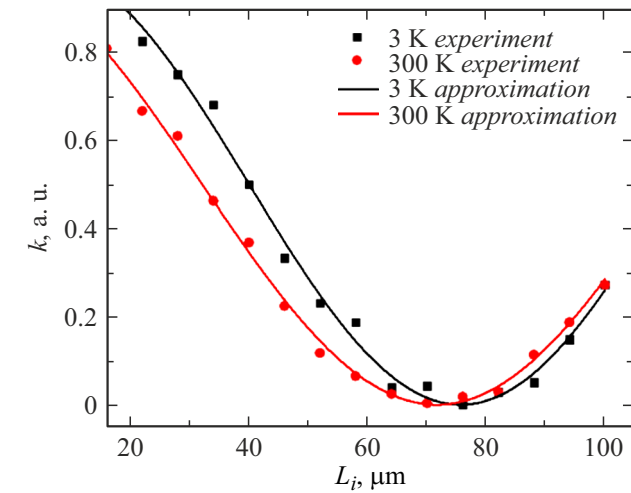
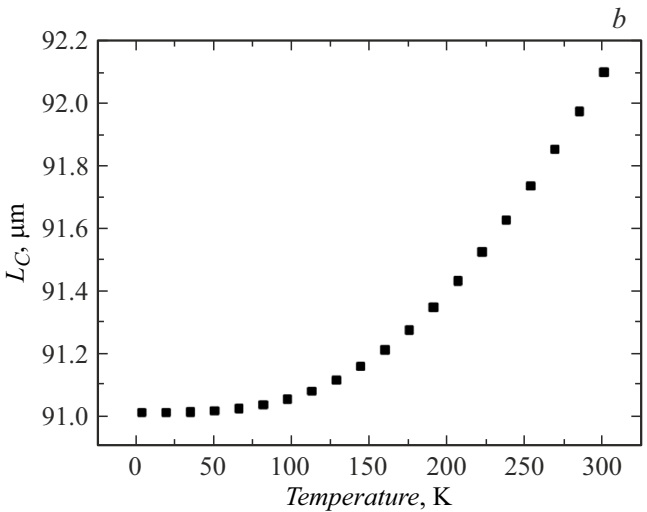
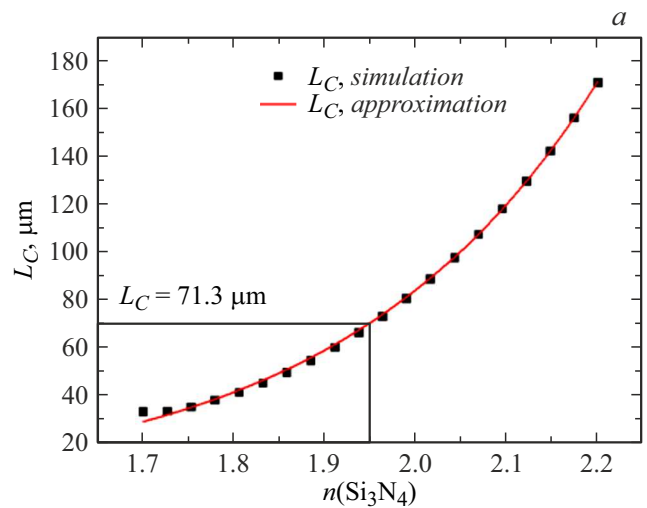


Рис. 6. Результаты измерений коэффициента деления направленных ответвителей, измеренных при комнатной (300 K) и криогенной (3 K) температурах, рассчитанных по формуле (2) и аппроксимированных формулой (3).

где P_1 и P_4 — оптическая мощность в портах 1 и 4 соответственно (рис. 2).

Полученные данные были аппроксимированы косинусоидальной зависимостью вида

$$k(L_i) = (1 + \cos(\pi L_i / L_C)) / 2. \quad (3)$$

В результате аппроксимации были получены значения характерных длин связи $L_C = 79 \pm 0.87 \mu\text{m}$ и $71.3 \pm 1.24 \mu\text{m}$ для комнатной и криогенной температур соответственно. Экспериментально полученное значение L_C для комнатной температуры близко к численному расчету $80.18 \mu\text{m}$. Уменьшение длины взаимодействия связано с уменьшением показателя преломления как Si_3N_4 , так и SiO_2 с температурой. В литературных данных значения коэффициента преломления для использованного нами в работе стехиометрического LPCVD Si_3N_4 при температуре 3 K авторам найти

Рис. 7. *a* — зависимость длины связи при фиксированном значении $n(\text{SiO}_2, 3\text{ K}) = 1.4501$ [14] и варьируемым значением показателя преломления $n(\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{ K})$ в диапазоне 1.7–2.2. Стрелкой обозначено значение, согласующееся с экспериментально полученными данными $L_C = 71.3 \pm 1.24 \mu\text{m}$; *b* — численно рассчитанная зависимость длины связи от температуры для PECVD нитрида кремния по данным работы [16].

не удалось. Зависимости термооптических коэффициентов для PECVD нитрида кремния (Plasma-enhanced chemical vapor deposition) и термического оксида SiO_2 представлены в работе [16]. Однако коэффициент преломления PECVD нитрида кремния, как и его термооптический коэффициент может сильно отличаться от стехиометрического LPCVD Si_3N_4 , поэтому может быть использован только в качестве грубой оценки. Используя данные по термооптическому коэффициенту из работы [16] вместе со значениями показателей преломления $n(\text{SiN}, 3\text{ K}) = 2.022$, $n(\text{SiN}, 300\text{ K}) = 2.0259$, $n(\text{SiO}_2, 3\text{ K}) = 1.4501$, $n(\text{SiO}_2, 300\text{ K}) = 1.4516$, и методику численного расчета, описанную выше, мы сначала нашли изменение длины связи от температуры для PECVD нитрида кремния (рис. 7, *b*). Видно, что длина

связи (также как и в нашем эксперименте) уменьшается с уменьшением температуры, однако значительно меньше, чем мы наблюдали (1.3% вместо 10.1% в нашем случае). Качественно уменьшение L_C связано с увеличением диаметра моды в волноводе, в результате которого большая мощность эванесцентной волны доходит до соседнего волновода, быстрее перетекая в него. Количественное различие нами связывается с отличающимися значениями показателя преломления для PECVD и LPCVD нитрида кремния как при комнатной, так и при гелиевой температурах. Используя $n(\text{SiO}_2, 3\text{ K}) = 1.4501$ [16], мы проварьировали показатель преломления для нитрида кремния, добиваясь совпадения измеренной длины связи с экспериментальной $L_C = 71.3 \pm 1.24 \mu\text{m}$ (рис. 7, а) и получили оценку $n(\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{ K}) = 1.953$ на $\lambda = 914\text{ nm}$.

Заключение

В работе были проведены измерения коэффициента деления направленных ответвителей из нитрида кремния. Были измерены зависимости коэффициента деления от длины взаимодействия волноводов, а также найдены длины связи $L_C = 79 \pm 0.87 \mu\text{m}$ и $71.3 \pm 1.24 \mu\text{m}$ для комнатной (300 K) и криогенной (3 K) температур соответственно. Качественно, уменьшение L_C с понижением температуры нами связывается с уменьшением показателя преломления как Si_3N_4 , так и SiO_2 . За счет этого увеличивается объем оптической моды в волноводе и мощность эванесцентной волны, достигающей соседнего волновода. На основании экспериментальных данных был получен показатель преломления, используемого нами в работе стехиометрического Si_3N_4 при температуре 3 K, который составил $n(\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{ K}) = 1.953$ на $\lambda = 914\text{ nm}$. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и изготовлении масштабируемых квантово-оптических интегральных микросхем со сверхпроводниковыми однофотонными детекторами, работающих при криогенных температурах и реализующих операции над оптическими кубитами.

Финансирование работы

Работа поддержана ГК „Росатом“ в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021 и Договоры № P2178, P2179).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J.L. O'Brien. *Nature*, **464**, 45 (2010). DOI: 10.1038/nature08812

- [2] H.S. Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, Ming-Cheng Chen, Li-Chao Peng, Yi-Han Luo, Jian Qin, Dian Wu, Xing Ding, Yi Hu, Peng Hu, Xiao-Yan Yang, Wei-Jun Zhang, Hao Li, Yuxuan Li, Xiao Jiang, Lin Gan, Guangwen Yang, Lixing You, Zhen Wang, Li Li, Nai-Le Liu, Chao-Yang Lu, Jian-Wei Pan. *Science*, **370**, 1460 (2020). DOI: 10.1126/science.abe8770
- [3] E. Knill, R. Laflamme, G.J. Milburn. *Nature*, **409**, 46 (2001). DOI: 10.1038/35051009
- [4] J.L. O'Brien, G.J. Pryde, A.G. White, T.C. Ralph, D. Branning. *Nature*, **426**, 264 (2003). DOI: 10.1038/nature02054
- [5] G.N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (6), 705 (2001). DOI: 10.1063/1.1388868
- [6] W.H.P. Pernice, C. Schuck, O. Minaeva, M. Li, G.N. Goltsman, A.V. Sergienko, H.X. Tang. *Nat. Commun.*, **3**, 1325 (2012). DOI: 10.1038/ncomms2307
- [7] J.P. Sprengers, A. Gaggero, D. Sahin, S. Jahanmirinejad, G. Frucci, F. Mattioli, R. Leoni, J. Beetz, M. Lerner, M. Kamp, S. Hfling, R. Sanjines, A. Fiore. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 181110 (2011). DOI: 10.1063/1.3657518
- [8] O. Kahl, S. Ferrari, V. Kovalyuk, G.N. Goltsman, A. Korneev, W.H.P. Pernice. *Sci. Rep.*, **5**, 10941 (2015). DOI: 10.1038/srep1094
- [9] P. Rath, O. Kahl, S. Ferrari, F. Sproll, G. Lewes-Malandrakis, D. Brink, K. Ilin, M. Siegel, C. Nebel, W. Pernice. *Light Sci. Appl.*, **4**, e338 (2015). DOI: 10.1038/lsa.2015.111
- [10] A. Al Sayem, R. Cheng, S. Wang, H.X. Tang. *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 151102 (2020). DOI: 10.1063/1.5142852
- [11] A. Prokhodtsov, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, R. Shakhovoy, V. Sharoglavova, A. Udaltsov, Y. Kurochkin, G. Goltsman. *J. Phys. Conf. Series*, **1695** (1), 012118 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012118
- [12] L. Donghao, L. Bin, T. Bo, Z. Peng, Y. YanL. Ruonan, X. Ling, L. Zhihua. *Micromachines*, **13** (4), 559 (2022). DOI: 10.3390/mi13040559
- [13] A.I. Galimov, M.V. Rakhlin, G.V. Klimko, Yu.M. Zadiranov, Yu.A. Guseva, S.I. Troshkov, T.V. Shubina, A.A. Toropov. *JETP Lett.*, **113** (4), 252 (2021). DOI: 10.31857/S1234567821040054
- [14] K. Luke, Y. Okawachi, M.R.E. Lamont, A.L. Gaeta, M. Lipson. *Opt. Lett.*, **40**, 4823 (2015).
- [15] I.H. Malitson. *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1205 (1965).
- [16] A.W. Elshaari, I.E. Zadeh, K.D. Jöns, V. Zwiller. *IEEE Photon. J.*, **8**, 1 (2016). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2561622