ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 12, с. 1741–1745

УДК 53.082.539+53.082.54

ВОЛОКОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СУЖЕННЫХ ВОЛОКОН

© 2021 г. О. П. Шиндяев[1, 2], А. В. Шкаликов[2, *]

[1]Государственное научное бюджетное учреждение "Академия наук Республики Татарстан", Институт прикладных исследований, Казань, Россия

[2]Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук", Казань, Россия

*E-mail: andrei_vs@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.
После доработки 26.07.2021 г.
Принята к публикации 27.08.2021 г.

Исследована возможность реализации волоконно-оптических устройств на основе суженных волокон. Для этого предложен метод, в котором суженные волокна объединяются в жгут и вновь подвергаются нагреву водородной горелкой и вытяжке с помощью однокоординатных трансляторов для их объединения в единое целое. Полученные волоконно-оптические устройства исследованы на разных длинах волн и сделаны выводы для дальнейшего совершенствования предложенной методики.

DOI: 10.31857/S0367676521120310

ВВЕДЕНИЕ

Оптические кварцевые волокна нашли широкое применение для создания волоконно-оптических линий связи, для научных исследований как в различных областях физики, медико-биологических исследованиях, так и при создании различных диагностических систем. При этом волокна используются как средство связи, так и непосредственно для создания чувствительных элементов для датчиков физических величин. Сегодня для создания сложных волоконных систем на рынке предлагаются различные устройства из кварцевых волокон, как активного действия, так и пассивного [1, 2].

Квантовая информатика [3–5] все больше переходит к практическому применению, так, например, расширяются возможности по безопасной передаче информации с помощью квантового шифрования и коммуникационных технологий; она позволяет проводить сверхчувствительные измерения на основе методов квантовой метрологии и незаменима для определенных вычислительных задач на квантовых компьютерах. Моделирование сложных квантовых систем с использованием квантовых компьютеров или управляемых квантовых систем позволяет понять такие сложные процессы, как сворачивание ДНК белков, динамику в химии и энергетике, транспорт в молекулярных и клеточных масштабах.

Квантовое моделирование, проводимое с использованием классических и квантовых состояний света в массивах связанных лазерных волноводов является одним из методов интегрированной квантовой фотоники, в которой оптические квантовые состояния обрабатываются в массивах волноводов [6]. Такие массивы волноводов также особенно хорошо подходят для некоторых квантовых симуляций из-за сходства между скалярным параксиальным уравнением оптической волны и уравнением Шрёдингера для связанной квантовой частицы. В данной работе предложен метод создания подобных волноводов на основе пучков суженных волокон, в которых выходящее из волокна эванесцентное поле взаимодействует с другими микроволокнами и является аналогом массива волноводов, описанных в работе [6]. Кроме того, следует отметить, что создание интегрально-волноводных чипов требует значительных затрат на специальное оборудование, а также продолжительного времени для получения волноводов в отличие от предлагаемых волоконных аналогов.

МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СУЖЕННЫХ ВОЛОКОН

Для изготовления волоконно-оптических устройств на основе суженных волокон необходима водородная горелка и механические транс-

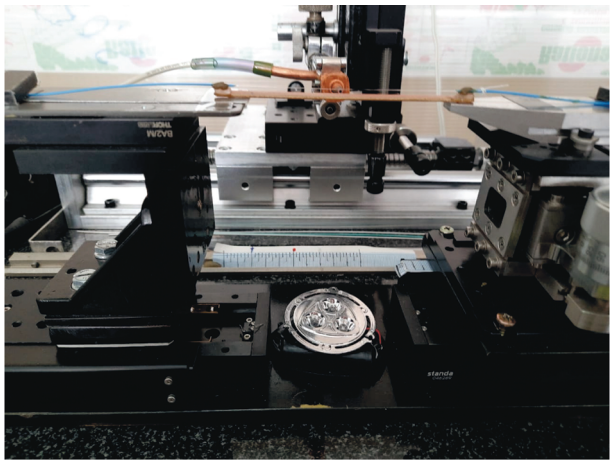

Рис. 1. Экспериментальный стенд для вытягивания волокна методом нагрева.

ляторы в количестве 2 шт. с шагом движения от 2.5 мкм за 1 шаг [7]. Эти инструменты сейчас находятся в широком доступе, и некоторые умельцы изготавливают их из отдельных элементов. Типичная установка по вытягиванию оптического волокна представлена на рис. 1. Физически изготовление суженного участка волокна представляет собой нагрев локального участка волокна до температуры, когда вязкость материала волокна снижается настолько, что становится возможным производить растягивание нагретого участка волокна с определенной скоростью.

На сегодня известны прямой и косвенный способы нагрева волокна. Прямой нагрев волокна может осуществляться путем непосредственного нагрева участка волокна в пламени горящей газовой горелки. Кроме того, для получения волокна с адиабатической суженной частью, а, следовательно, с малыми потерями, используется так называемый метод “выглаживания” или “брошированиия” волокна пламенем горелки. Существуют разные схемы движения волокна и горелки. Нами была выбрана схема, когда горелка, закрепленная в отдельном трансляторе, совершает независимые возвратно-поступательные движения, а растяжение волокна происходит другими двумя растягивающими трансляторами. При этом управление транслятором для горелки и трансляторами, растягивающими волокно, происходит отдельными независимыми программами через отдельные контроллеры.

Разработанная технология получения волоконных устройств реализуется в два этапа.

1. Для изготовления участка суженного волокна из исходного оптического кварцевого волокна очень важна температура нагрева, которая должна находиться в определенном диапазоне. С одной стороны, она должна быть достаточно высокой, чтобы иметь минимально необходимую вязкость для вытяжки кварцевого волокна. С другой стороны, она не должна быть слишком высокой, так как известно, что при нагреве кварца до температуры плавления 1550°C и выше, а затем последующем его охлаждении, происходит кристаллизация кварца в виде β-модификации. Появление кристаллов β-модификации кварца в волокне, в свою очередь, приводит к существенным оптическим потерям в волокне. Таким образом, нагрев участка кварцевого волокна для вытяжки не должен превышать 1500°C.

Горелка изготовлена из меди с диаметром выходного отверстия 1 мм. Для создания водородно-кислородного пламени использовали водород, получаемый из генератора водорода “ЦветХром-16” мощностью 16 л/ч (г. Дзержинск). Горелка закреплялась в отдельно собранном трансляторе с возможностью регулирования по двум координатам относительно волокна с высокой точностью (0.05 мм), движение горелки происходит параллельно волокну.

Количество подаваемого газа в горелку регулировалось формирователем газовых потоков “Хроматек” (г. Йошкар-Ола). Данный формирователь позволяет одновременно регулировать подачу нескольких газов (от 2 до 4) в горелку объемом до 500 мл/мин. При отработке технологии мы подачу газа производили в пределах от 70 до 250 мл/мин.

Для вытягивания волокна применяют моторизованные подвижки (трансляторы), приспособленные для закрепления на себе кварцевого волокна, способные производить с регулируемой скоростью линейное перемещение, при этом закрепленное и нагретое волокно растягивается. Управление скоростью перемещения происходит по программе через контроллер, причем скорость не превышала нескольких сотен микрон в секунду. Отдельные кварцевые волокна зажимаются на механическом трансляторе, происходит нагрев водородной горелкой до размягчения и производится вытяжка с определенной скоростью и длиной вытяжки от 10 до 20 мм для создания одинаковых вытянутых волокон для создания на их основе волоконных устройств. Следует отметить, что описанная выше технология вытягивания волокон не нова и в различных вариациях описана в работах, представленных в следующем обзоре и диссертации [8, 9].

2. Вытянутые суженные в диаметре волокна собираются в скрученный жгут. Затем его закрепляют в механическом трансляторе. Далее жгут подогревают до температуры плавления 1500°C и еще раз немного вытягивают. Волокна в жгуте сплавляются, что открывает возможность передачи излучения от одного волокна к другим волокнам в жгуте. Именно на этом этапе (например, в

Таблица 1. Распределение интенсивности на выходах делителя 1 в 2 для трех длин волн

Длина волны излучения, нм	Мощность на входе (канал 1), мкВт	Выходные каналы	Мощность на выходе, нВт
650	1.02	2	315
		3	33
1310	1.55	2	405
		3	1020
1550	3.5	2	215
		3	3200

Таблица 2. Распределение интенсивности на выходе сумматора 2 в 1

Длина волны излучения, нм	Мощность на входе (канал 1), мкВт	Входные каналы	Мощность на выходе (канал 1), нВт
650	1.02	2	850
		3	670
1310	1.55	2	830
		3	620
1550	3.5	2	970
		3	880

случае изготовления делителя 1 × 2) можно контролировать коэффициент отведения мощности в волокна. На один из входов подается излучение на требуемой длине волны, а на выходах фотодетекторами измеряется выходное излучение. Когда на фотодетекторах устанавливаются одинаковые показатели сплавка-вытяжка волокна прекращается. Несколько слов по вопросу о контроле для получения определенных нужных соотношений при делении: 1) контроль позволяет создавать нужное соотношение делителя для конфигураций 1 × 2, 1 × 3; 2) при других типах “больших” делителей (1 × 4, 1 × 5, 1 × 6) контроль нужен только для получения равного разделения по всем волокнам, другие получаемые соотношения деления по волокнам в общем-то случайны и трудно контролируемые; 3) чем больше вытяжка образца, тем распределение по волокнам более равномерно и это естественно.

ПРОСТЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

В результате описанных выше действий были получены разветвители, делители и сумматоры с максимальным значением используемых волокон равным 6, т.е. делитель 1 на 6 или сумматор 6 в 1. Были проведены исследования изготовленных на описанной выше установке делителя 1 в 2 и сумматора 2 в 1 на различных длинах волн. Сначала рассмотрим делитель, когда вводимое излучение делится на два канала. Результаты измерений делителя 1 в 2 представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наибольшие потери наблюдаются на длине волны 650 нм, что обусловлено, с нашей точки зрения, применением одномодового волокна, предназначенного для длины волны 1.55 мкм. В случае же длин волн 1.31 и 1.550 мкм потери на делителе составляют 0.1–0.2 Дб, что соответствует и даже превосходит существующие коммерческие устройства, изготовленные на основе технологий PLC (Planar Lightwave Circuit) и FBT (Fused Biconical Taper) [10, 11]. При увеличении числа волокон до 5 потери на этих длинах волн увеличиваются до 0.4–0.5 Дб. Изготовленные сумматоры были также измерены, результаты измерений для сумматора 2 в 1 представлены в табл. 2.

Процесс измерения проходил следующим образом: сначала на один из входов сумматора (№ 2) подавалось оптическое излучение, а на выходе (№ 1) измерялось прошедшее излучение (оно показано в последней колонке табл. 2). Затем излучение подавалина второй вход (№ 3) сумматора и также измеряли интенсивность на выходе. Как видно из табл. 2 результаты для сумматора значительно скромнее, например, для 650 нм при подаче на входы (2 и 3) 1 мВт на выходе 1 будет наблюдаться 0.85 и 0.67 мВт, соответственно. Как следствие, потери в сумматоре довольно большие и

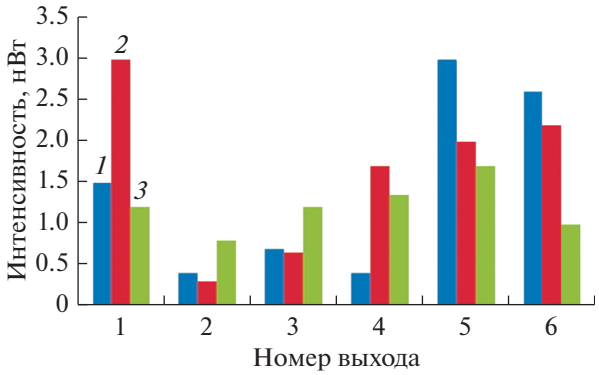

Рис. 2. Зависимость мощности оптического излучения от выхода для разных длин волн: 650 (*1*), 1310 (*2*), 1550 нм (*3*).

доходят до 5 Дб, что значительно больше потерь в существующих коммерческих изделиях [10, 11].

СЛОЖНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Компьютерное моделирование сложных систем достигло значительных высот в современной науке благодаря методам аппроксимации и постоянно растущей вычислительной мощности. Однако классические методы моделирования не подходят для моделирования квантовых систем даже умеренного размера из-за экспоненциально увеличивающегося пространства параметров. Фейнманом было впервые предложено [12], что возможное решение состоит в том, чтобы сама модель работала через квантовую, а не классическую динамику, либо через моделирование, в котором цифровая модель на квантовом компьютере дает физические величины (см., например, [13, 14]), либо посредством эмуляции, при которой квантовая система моделируется более управляемой системой с достаточно похожим гамильтонианом [15]. Одним из методов решения являются квантовые блуждания [16, 17], которые представляют собой расширение понятия классических случайных блужданий на квантовый мир.

Наиболее интересным случаем являются квантовые блуждания в трехмерных структурах и, как правило, выполненные в виде массивов оптических волноводов в плавленом кварце [18, 19]. Поэтому было решено повторить массив волноводов используя суженные волокна. Был реализован массив из 6 суженных волокон диаметром 5–20 мкм, переплетенных друг с другом (3–4 оборота) и длиной суженной зоны около 15 мм. Полученный жгут был прогрет до температуры близкой к температуре плавления и зафиксирован в данном положении. В поперечном разрезе полученный жгут микроволокон представлял собой кольцо, когда излучение от одного волокна может перейти только к двум соседним волокнам. Такая конфигурация полностью повторяет объемные волноводы в работе [6]. На вход волокна подавалось лазерное излучение, а на выходах делались измерения выходной мощности. На рис. 2 представлены измеренные значения оптической мощности в нВт для выходных каналов в условиях, когда излучение подавалось на вход № 5. В случае изменения входа ввода излучения картина на выходах качественно не менялась. Из рис. 2 видно, что форма распределения излучения на выходах отличается от колоколообразной и существуют выбросы на 1310 нм в первом канале. Такие отклонения можно объяснить, как не идеальностью геометрической формы получаемого жгута волокон и разбросом диаметра суженных волокон, так и неравномерностью прогрева жгута волокон.

Полученные оптоволоконные устройства позволяют проводить эмуляцию квантовой системы в трехмерных фотонных архитектурах. Дальнейшим естественным шагом для характеризации изготовленного жгута микроволокон является проведение оптической томографии и изучение связей между волноводами в жгуте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет изготавливать как простые волоконно-оптические устройства (делители, разветвители, сумматоры) так и более сложные системы взаимодействующих волокон. Показано, что в случае простых устройств потери определяются длиной волны, и в области 1.55 мкм близки к нулю.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20091) – Шкаликов А.В., и темой государственного задания № АААА-А18-118030690040-8 – Шиндяев О.П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jedrzejewski K.P., Martinez F., Minelly J.D. et al.* // Electron. Lett. 1986. V. 22. P. 105.
2. *Kawasaki B.S., Hill K.O., Lamont R.G.* // Opt. Lett.1981. V. 6. P. 327.
3. *Самарцев В.В., Камалова Д.И., Митрофанова Т.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1738; *Samartsev V.V., Kamalova D.I., Mitrofanova T.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 12. P. 1574.
4. *Юдсон В.И., Макаров А.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1621; *Yudson V.I., Makarov A.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 12. P. 1556.
5. *Федоров М.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 3. С. 272; *Fedorov M.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2012. V. 76. No. 3. P. 233.
6. *Owens J.O., Broome M.A., Biggerstaff D.N. et al.* // New J. Phys. 2011. V. 13. Art. No. 075003.

7. *Андрианов С.Н., Кочнева Ю.Ю., Шиндяев О.П., Шкаликов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1621; *Andrianov S.N., Kochneva Yu.Yu., Shindyaev O.P., Shkalikov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 12. P. 1462.
8. *Ward J.M., Maimaiti A., Le V.H., Chormaic S.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. Art. No. 111501
9. *Lutzler C.* Fabrication of optical microfibers. Master thesis in physics. Bonn: University of Bonn, 2012. 81 p.
10. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9567.
11. https://www.fiberopticplc.com/product/Fiber-Optic-FBT-Splitter.html.
12. *Feynman R.* // Int. J. Theor. Phys. 1982. V. 21. P. 467.
13. *Lanyon B.P., Whitfield J., Gillett G. et al.* // Nature Chem. 2010. V. 2. P. 106.
14. *Du J., Xu N., Peng X. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. Art. No. 030502.
15. *Lloyd S.* // Science. 1996. V. 273. P. 1073.
16. *Aharonov Y., Davidovich L., Zagury N.* // Phys. Rev. A 1993. V. 48. Art. No. 1687.
17. *Kempe J.* // Contemp. Phys. 2003. V. 44 P. 307.
18. *Davis K.M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K.* // Opt. Lett. 1996. V. 21. P. 1729.
19. *Nolte S., Will M., Burghoff J.* // Appl. Phys. A. 2003. V. 77. P. 109.

Fiber optical devices based on tapered fibers

O. P. Shindyaev[a, b], A. V. Shkalikov[b, *]

[a] *Institute for Applied Research, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 420111 Russia*

[b] *Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia*

**e-mail: andrei_vs@rambler.ru*

The possibility of realizing fiber-optic devices based on tapered fibers is considered. The method is proposed in which the necked fibers are combined into a bundle and again heated by a hydrogen burner and drawn using one-coordinate translators to combine them into a single whole. The resulting fiber-optic devices were investigated at different wavelengths and conclusions were drawn for further improvement of the proposed technique.