ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 12, с. 1735–1738

УДК 53.082.539:53.082.54

ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОФОН НА ОСНОВЕ СУЖЕННОГО ВОЛОКНА

© 2020 г. С. Н. Андрианов[1, *], А. А. Калачев[2], Ю. Ю. Кочнева[1], О. П. Шиндяев[1], А. В. Шкаликов[2, 3]

[1]Государственное научное учреждение Республики Татарстан 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

[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет", Казань, Россия

*E-mail: andrianovsn@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.
После доработки 10.08.2020 г.
Принята к публикации 26.08.2020 г.

Исследованы технологические процессы изготовления электроискровым методом суженных волокон с короткой областью сужения для оптических микрофонов нового поколения. Сообщается об экспериментальной реализации метода изготовления нановолокон с заданными параметрами на установке со специализированными возможностями для реализации этих процессов. Экспериментально исследованы характеристики пропускания излучения через такие суживающиеся волокна в поле звуковой волны. Теоретически определены оптимальные параметры суженных волокон для создания высокоэффективных оптических микрофонов.

DOI: 10.31857/S0367676520120042

ВВЕДЕНИЕ

В современной цифровой экономике, образовании и науке необходимы датчики различных физических величин и периферийные устройства, которые могли бы собирать звуковую и визуальную информацию, информацию о состоянии среды и цифровой системы, а затем передавать ее на центральный процессор. Для получения звуковой информации используются микрофоны. Первый микрофон, созданный американским изобретателем Александром Грехемом Беллом в 1980 [1], был оптическим, так как первоначально он при разработке телефона считал, что свет лучше всего подходит для передачи информации, обладая наибольшей скоростью распространения. Однако, затруднение возникло при воспроизведении сигнала, так как свет в открытом пространстве сложно использовать для генерации акустического сигнала.

В этом отношении целесообразно использовать волоконные датчики и периферийные устройства, так как оптические волокна могут служить одновременно как чувствительный элемент и как средство передачи информации. В частности, большими преимуществами обладает волоконно-оптический микрофон [2], так как он позволяет записывать звуковую информацию без электромагнитных помех и передавать ее непосредственно по волоконной линии связи. При этом наиболее технологически удобны датчики на основе суженного волокна [3, 4], так как в таких датчиках излучение в целом не выходит из волокна, и поэтому монолитность конструкции системы не нарушается.

Относительная чувствительность датчика работы [3] составляла порядка 5 дБ при абсолютной чувствительности 2–3 мВ/Па. При этом толщина суженного волокна составляла около 14 мкм. В работе [5] для регистрации малого смещения применялся датчик на основе волокна толщиной около 2 мкм. Его чувствительность составляла 102 пкм/мкм с общей чувствительностью до 12 дБ. Из этих данных видно, что датчик с меньшей толщиной волокна показал большую чувствительность. В наших экспериментах мы использовали волокна с еще меньшей толщиной порядка 1 мкм, что соответствует чувствительности более 12 дБ, т.е. около 5 мВ/Па.

Таким образом, для обеспечения высокой чувствительности и компактности датчиков необходимо использовать нановолокна с малой длиной и толщиной суженной части. Поэтому необходимо, чтобы общая область сужения была достаточно короткой. С другой стороны, длина суженного волокна и толщина не должны быть слишком ма-

лы, так как в противном случае могут произойти существенные потери излучения и даже физический облом нановолокна. Поэтому необходимо обеспечить устойчивую повторяемость изготовления нановолокна с критическими параметрами, определяющимися вышеуказанными соображениями. Существующая стандартная аппаратура для вытягивания волокон в пламени горелки не обеспечивает такой повторяемости для волокон с короткой длиной сужения.

В данной работе мы теоретически изучаем оптимальные условия функционирования волоконно-оптических микрофонов на основе суженного волокна и сообщаем о разработке микрофона на основе суженного оптического волокна с малой длиной и толщиной суженной части методом вытягивания в электрической дуге.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОФОН

Волоконно-оптические датчики на основе суженного волокна

Одно из основных приложений суженных волокон в квантовой оптике это генерация однофотонных состояний [6], но с недавнего времени появились новые приложения. Так в работе [7] предложен датчик температуры на основе волокон с разными диаметрами сердцевины. В нем два волокна с большим значением диаметра сердцевины соединены между собой встык волокном с меньшим диаметром. На первом стыке часть излучения передается в моды оболочки, а другая часть остается в сердцевине соединяющего волокна. На втором стыке эти моды вновь объединяются и интерферируют. Вся конфигурация представляет собой компактный интерферометр Маха–Цендера, модовый спектр которого выражается как

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\varphi. \tag{1}$$

Здесь разность фаз задается формулой

$$\varphi = \Delta\beta L, \tag{2}$$

где разность постоянных распространения в сердцевине и оболочке

$$\Delta\beta = 2\pi\left(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}\right)/\lambda = 2\pi\Delta n_{eff}/\lambda, \tag{3}$$

n_{eff}^{core} – эффективный показатель преломления сердцевины, n_{eff}^{clad} – эффективный показатель преломления оболочки, λ – длина волны излучения, L – длина отрезка волокна с меньшим диаметром сердцевины.

Волоконно-оптический микрофон на основе суженного волокна для продольных звуковых колебаний

В оптическом микрофоне на основе суженного волокна длина суженной части может быть записана как

$$L = L_0 + \delta L(t), \tag{4}$$

где $\delta L(t)$ приращение длины суженной части вследствие акустического воздействия. Тогда из формул (1), (2), (4) следует, что

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\{\cos(\Delta\beta L)\cos\{\Delta\beta\delta L(t)\} - \\ - \sin(\Delta\beta L)\sin\{\Delta\beta\delta L(t)\}\}. \tag{5}$$

Отсюда для переменной части интенсивности будем иметь:

$$\delta I(t) = I(t) - I_1 + I_2 = 2\sqrt{I_1 I_2}\{\cos(\Delta\beta L)\times \\ \times\cos\{\Delta\beta\delta L(t)\} - \sin(\Delta\beta L)\sin\{\Delta\beta\delta L(t)\}\}. \tag{6}$$

Если $\Delta\beta\delta L(t) \ll 1$, это выражение упрощается до

$$\delta I(t) = 2\sqrt{I_1 I_2}\{\cos(\Delta\beta L) - \sin(\Delta\beta L)\Delta\beta\delta L(t)\}, \tag{7}$$

где n – целое число. Это выражение показывает зависимость интенсивности света в волокне от изменения длины его суженной части, т.е. от звукового сигнала.

В соответствии с формулой (1) в спектральной кривой пропускания возникают провалы, когда φ принимает значения, кратные π. При этом из соотношения (1) следует, что спектральное положение этих провалов определяется как

$$\lambda_D = 2\Delta n_{eff} L/(2n+1), \tag{8}$$

Если при изменении температуры Δn_{eff} меняется на δn_{eff} положение провала меняется на

$$\delta\lambda_D \approx 2L\delta n_{eff}. \tag{9}$$

С другой стороны, положение спектрального провала также будет меняться под действием звуковой волны в соответствии с выражением

$$\delta\lambda_D = 2\Delta n_{eff}\delta L\ . \tag{10}$$

Таким образом, для записи звуковой информации и ее последующего воспроизведения может быть использован не только амплитудный, но и спектральный протокол. В последнем случае зависимость сигнала микрофона от звуковых параметров может быть более простой.

Волоконно-оптический микрофон на основе суженного волокна для поперечных звуковых колебаний

В случае, когда звуковая волна подается перпендикулярно к оптическому волокну, происходит изменение распределения излучения в сердцевине и оболочке, вызывает изменение выход-

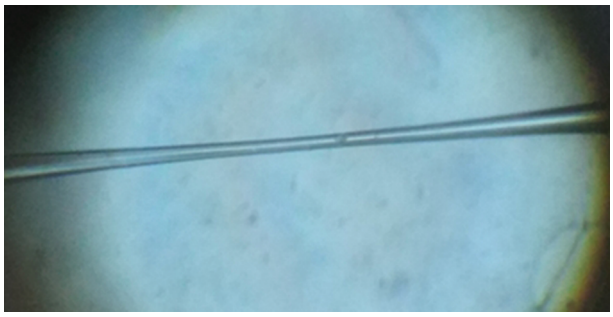

Рис. 1. Участок коротковытянутого волокна, полученный с помощью электрической дуги.

ной интенсивности. Изменение длины волокна в этом случае мало, и его можно не учитывать. Для этого перепишем формулу (5) в виде

$$I = I_0\left(1 + \frac{2\sqrt{x}}{1+x}\cos\varphi\right), \tag{11}$$

где $I_0 = I_1 + I_2$, $x = \dfrac{I_1}{I_2}$.

Дифференцирование выражения (8) по x дает

$$I'(x) = I_0\frac{1-x}{\sqrt{x}(1+x)^2}. \tag{12}$$

Приравнивая производную к нулю $I'(x_m) = 0$, получим условие максимума интенсивности $x_m = 1$, откуда следует, что $I_1 = I_2$, т.е. оптимальным является равное распределение излучения между сердцевиной и оболочкой. При отклонении величины x от оптимального значения на δx вследствие преобразования мод сердцевины и оболочки при звуковой модуляции для интенсивности сигнала получим

$$I = I_0\left(1 + \frac{2\sqrt{1+\delta x}}{2+\delta x}\cos\varphi\right). \tag{13}$$

Сигнал волоконно-оптического микрофона был оценен экспериментально.

Для изготовления чувствительного элемента микрофона в виде вытянутого волокна с помощью электрической дуги участок одномодового кварцевого волокна SMF 125/10 нагревался дуговым разрядом и затем быстро вытягивался. В результате быстрого растяжения узкой горячей зоны, вытянутый участок имеет крутой, неадиабатический угол конуса и компактный размер. Он имеет диаметр талии ~20 мкм и общую длину вытяжки ~1000 мкм, рис. 1. Более подробно технология вытягивания описана в [8].

С помощью этого суженного волокна был изготовлен датчик звуковых колебаний в виде специально разработанной для этого установки общий вид которой показан на рис. 2*а*, на котором рабочая часть датчика показана стрелкой. Для изготовления рабочей части датчика участок с коротковытянутым волокном закреплялся клеем по краям на тонкой (0.5 мм) металлической пластине, которая в свою очередь крепилась к динамику, подключенному к генератору звуковых частот (рис. 2*б*).

Для проверки характеристик изготовленного таким образом датчика через коротковытянутое волокно проходило излучение на длине волны 650 нм и регистрировалось фотодиодом ФД24, сигнал с которого регистрировался осциллографом Tektronix tds 220.

Поскольку толщина суженной части была гораздо меньше, чем в работах [3, 4], и сопоставима с длиной волны излучения, мы работали в квазидвухмодовом режиме. В случае подачи и выключения электрического сигнала с генератора на динамик в результате колебаний коротко суженного

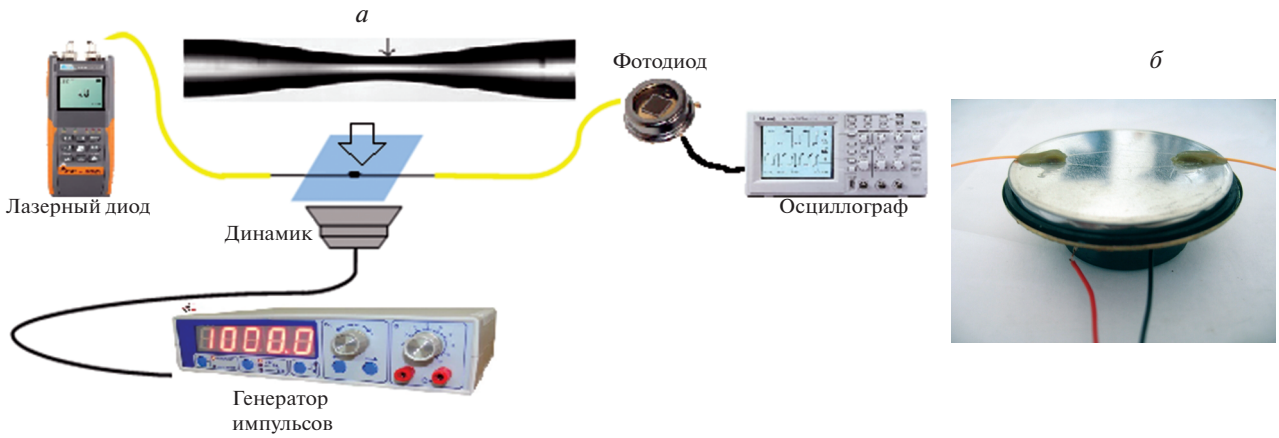

Рис. 2. Блок-схема экспериментального стенда для измерения пропускания суженного волокна, в условиях воздействия поперечных звуковых импульсов; общий вид установки (*а*), рабочая часть установки (*б*).

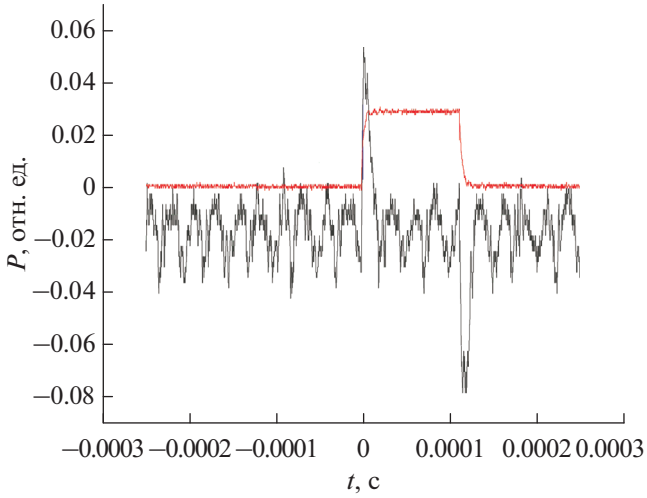

Рис. 3. Звуковой (красная кривая) и электрический (черная кривая) сигналы датчика колебаний (P – давление воздуха, t – время).

волокна из-за взаимодействия мод на сужении происходило перераспределение интенсивности излучения в сердцевине и оболочке и, как следствие, изменение оптического сигнала на фотодиоде согласно формуле (13). Перераспределение излучения в суживающемся волокне под действием связи между модами рассмотрено в работе [9], где показано, что взаимодействие между модами зависит от толщины волокна. При прохождении звуковой волны поперек волокна изменение толщины происходит лишь в присутствии фронта звуковой волны внутри волокна, так как в противном случае происходит лишь изгиб волокна как целого. Типичная осциллограмма приведена на рис. 3. Из нее видна реакция фотодиода (черная кривая) на поступающие фронты звуковых импульсов (красная линия). При этом положительный всплеск соответствует входному фронту, а отрицательный – выходному.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели режимы работы волоконно-оптического микрофона на основе суженного волокна и показали возможность его реализации. Такой микрофон не боится электромагнитных наводок и позволяет передавать звуковой сигнал на любое расстояние в оптическом волокне. В поперечной геометрии, как в нашем эксперименте, изменение длины волокна не существенно и сигнал возникает в основном при прохождении волнового фронта звука через волокно, что уменьшает шумы микрофона. Однако, при фиксации всего звукового импульса мощность сигнала, описываемого формулой (13), больше, и в стабильных внешних условиях вариант продольной подачи звука может оказаться эффективнее. Квазидвухмодовый режим работы обеспечивает чисто интерференционный режим работы в отличие от микрофонов такого типа, создававшихся ранее.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-20091 – теория) и в рамках темы государственного задания № АААА-А18-118030690040-8 (эксперимент).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schreiber P., Kudaev S., Gorelik V., Peissig J.* // AES1116th Convention. (Berlin, 2004). P. O-4.
2. *Xu F., Shi J., Gong K., Li H. et al.* // Opt. Lett. 2014. V. 39. № 10. P. 2838.
3. *Dass S., Rajan I.* // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. № 24. P. 5411.
4. *Dass S., Kachhap S., Rajan I.* // J. Phys. Photon. 2019. V. 1. Art. № 025005.
5. *Luo H., Li X., Zou W. et al.* // IEEE Photon. J. 2012. V. 4. № 3. P. 772.
6. *Шухин А.А., Калачев А.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 7. С. 861; *Shukhin A.A., Kalachev A.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. № 7. P. 785.
7. *Nguyen L.V., Hwang D., Moon S. et al.* // Opt. Expr. 2008. V. 16. № 15. P. 11369.
8. *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 U.U., Shindiaev O.P. Shkalikov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 12. P. 1462.
9. *Srinivas T., Miyazaki Y.* // J. Ind. Ins. Sci. 1996. V. 76. P. 201.