

## Спектр изогнутого волоконного интерферометра Фабри–Перо при малых вариациях показателя преломления внешней среды

Ю.Н.Кульчин, О.Б.Витрик, С.О.Гурбатов

*Показано, что фаза излучения, направляемого по изогнутому волоконному световоду, изменяется в зависимости от показателя преломления среды, окружающей оптическую оболочку световода, при обеспечении в нем резонансной связи направляемой моды сердцевины с модами оптической оболочки. Это приводит к соответствующему сдвигу спектральных максимумов в изогнутом волоконном интерферометре Фабри–Перо. Его максимальные достигнутые фазовая и спектральная чувствительности, составляющие соответственно 0.71 и 0.077, позволили зарегистрировать минимальное изменение показателя преломления внешней среды на  $5 \times 10^{-6}$ . Это делает предложенный подход перспективным для создания прецизионных высокостабильных сенсоров показателя преломления, используемых при решении широкого круга задач рефрактометрии жидких сред.*

**Ключевые слова:** одномодовый волоконный световод, волоконный интерферометр Фабри–Перо, прецизионная рефрактометрия жидких сред, резонансная связь волноводных мод.

Традиционные оптические рефрактометры, например на основе схем Аббе, Пульфриха, Рэлея и др., с чувствительностью  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  широко применяются для измерения показателя преломления жидкостей и концентрации веществ в растворах при идентификации химических соединений, их количественном и структурном анализе, контроле качества при производстве нефтепродуктов, установлении чистоты лекарственных средств, контроле загрязнения окружающей среды, определении физико-химических параметров веществ, а также мониторинге биохимических реакций [1, 2]. Однако в связи с дальнейшим развитием биохимии и медицины, а также с повышением требований к экологическому мониторингу потребовалось увеличить чувствительность рефрактометров при решении указанных задач до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$ . Для этого был разработан новый класс устройств для измерения показателя преломления, в основу которых легло явление поверхностного плазмонного резонанса [3]. Такие устройства в настоящее время получили широкое распространение [3]. К сожалению, в большинстве случаев указанные измерительные устройства являются довольно громоздкими, они сложны в использовании, особенно при проведении экспресс-анализа в полевых условиях, а также при удаленных измерениях [1–3].

Известно, что переход от объемных оптических элементов к волоконно-оптической элементной базе позволяет упростить сборку, инсталляцию и использование оптических измерительных устройств, способно уменьшить их габариты и вес, обеспечивает возможность удаленных измерений, в том числе в режиме реального времени [4]. В настоящее время известно большое число схем

волоконно-оптических рефрактометров, например на основе волоконных решеток Брэгга, длиннопериодных волоконных дифракционных решеток либо волоконных интерферометров Маха–Цендера, Майкельсона и др., а также с использованием стыковки световодов с разной по диаметру сердцевиной и суженных световодов [5–9]. Несмотря на значительные успехи в данной области, требуется проведение дальнейших работ, которые позволили бы достигнуть сочетания высокой чувствительности рефрактометров с высокой надежностью, а также потенциально низкой стоимостью, что в большинстве случаев обеспечивается упрощением конструкции таких устройств [4, 6–8].

Интересный подход к задаче создания волоконно-оптических рефрактометров сформулирован в работе [10]. В ней предлагается проводить измерения показателя преломления окружающей волоконный световод жидкости путем регистрации потерь мощности направляемого оптического излучения в одномодовом волоконном световоде при обеспечении в нем условий резонансной связи основной моды сердцевины с модами оптической оболочки световода. Такая связь достигается без нарушения условий полного внутреннего отражения основной моды сердцевины за счет туннельного эффекта, возникающего при падении световых волн на границу между сердцевиной и оболочкой изогнутого волоконного световода. При этом эффективность связи мод зависит от соотношения показателей преломления оптической оболочки и внешней по отношению к световоду среды, что обеспечивает чувствительность устройства к изменению показателя преломления  $\sim 10^{-4}$  [9].

Хотя описанная схема обеспечивает высокую стабильность измерительного преобразователя, а также предельную простоту его конструкции (рефрактометр по сути состоит из одного витка волоконного световода с заданным радиусом), чувствительность метода оказывается недостаточной для решения современных задач рефрактометрии жидкостей. Нам представляется, что ее можно повысить, регистрируя не амплитудные, а фазо-

Ю.Н.Кульчин, О.Б.Витрик, С.О.Гурбатов. Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: director@iacp.dvo.ru, oleg\_vitrik@mail.ru, gurbatov\_slava@mail.ru

Поступила в редакцию 20 июня 2011 г. после доработки – 25 июля 2011 г.

вые изменения основной моды волоконного световода. Такие изменения могут быть зарегистрированы с использованием схемы волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо по сдвигу его спектральных максимумов. Однако процессы модуляции спектра изогнутого волоконного интерферометра Фабри–Перо при малых вариациях показателя преломления внешней среды изучены мало, что и явилось стимулом к проведению настоящей работы.

Исследуемый интерферометр Фабри–Перо представляет собой изогнутый отрезок кварцевого одномодового волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления (рис.1) с нанесенными на его торцы металлическими зеркальными покрытиями. Интерферометр помещается в жидкость с исследуемым показателем преломления  $n_3$ , который выше показателя преломления оптической оболочки световода  $n_2$ . Изгиб световода вызывает туннелирование части направляемого излучения в оптическую оболочку световода, что приводит к возбуждению в ней соответствующего набора собственных волн. Комплексный френелевский коэффициент отражения оболочечных мод на границе раздела оптическая оболочка/внешняя среда и, следовательно, их амплитуда и фаза зависят от соотношения между  $n_2$  и  $n_3$ . При выборе определенного радиуса изгиба световода обеспечивается резонансная связь мод оптической оболочки с основной модой сердцевинки. Вследствие этого фаза моды сердцевинки также зависит от  $n_3$ , что в свою очередь приводит к смещению резонансных максимумов в спектре интерферометра Фабри–Перо.

Для нахождения радиусов изгиба, обеспечивающих резонансное взаимодействие мод сердцевинки и оболочки в одномодовом волоконном световоде, была использована теоретическая модель [11]. В рамках этой модели зависимость коэффициента ослабления мощности  $\alpha$  основной направляемой моды от радиуса изгиба  $R$  одномодового волоконного световода имеет следующий вид:

$$\alpha(R) = \frac{\kappa^2 \exp(-2\gamma^3 R/3k^2 n_2^2)}{\gamma \beta V^2 K_1^2(\rho \gamma)} \times \int_0^\infty \frac{\sqrt{\chi_2(R, \zeta) \chi_3(R, \zeta)} \exp(-\gamma R \zeta^2 / k^2 n_2^2)}{\chi_2(R, \zeta) \cos^2 \Theta(\zeta) + \chi_3(R, \zeta) \sin^2 \Theta(R, \zeta)} d\zeta, \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиус сердцевинки световода;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $V = k\rho\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  – приведенная частота;  $n_1$  – показатель преломления сердцевинки свето-

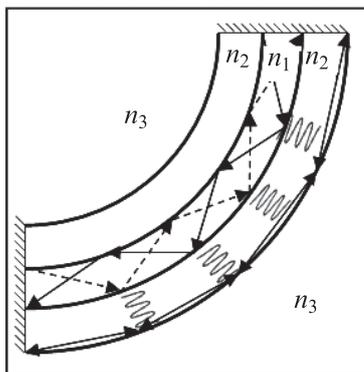


Рис.1. Распространение излучения в изогнутом волоконном интерферометре Фабри–Перо;  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  – показатели преломления сердцевинки, оболочки и окружающей жидкости.

вода;  $\beta$  – постоянная распространения основной моды;  $\kappa = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2}$ ;  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k^2}$ ;  $K_1$  – функция Макдональда 1-го порядка;  $b$  – внешний радиус оптической оболочки световода;  $\zeta$  – пространственная частота;

$$\chi_q(R, \zeta) = (2k^2 n_q^2 / R)^{2/3} [-X_q(R, \zeta)];$$

$$X_q(R, \zeta) = [R/(2k^2 n_q^2)]^{2/3} [\beta^2 + \zeta^2 - k^2 n_q^2 (1 + 2b/R)]; \quad q = 2, 3$$

$$\Theta(R, \zeta) = \frac{2}{3} [-X_2(R, \zeta)]^{3/2} + \pi/4.$$

На рис.2 представлены рассчитанная в соответствии с выражением (1) зависимость  $\alpha(R)$  (сплошная линия) и полученные нами экспериментальные данные (точки) для одномодового волоконного световода с параметрами  $\rho = 4.15$  мкм,  $n_1 = 1.467$ ,  $n_2 = 1.462$ ,  $n_3 = 1.479$  при длине волны направляемого излучения  $\lambda = 1.55$  мкм. Видно, что зависимость  $\alpha(R)$  имеет ряд максимумов, наличие которых объясняется резонансной связью мод сердцевинки с модами оптической оболочки световода [11].

В соответствии с полученными результатами (рис.2) были изготовлены волоконные интерферометры Фабри–Перо с радиусами изгиба  $R = 9.4$  и  $10.7$  мм. Радиус  $8.3$  мм, при котором, согласно данным рис.2, также имеет место резонансная связь мод сердцевинки и оболочки рассматриваемого световода, при создании экспериментальных образцов интерферометров нами не использовался, поскольку оказалось, что при таком радиусе велик риск механического разрушения световода. Кроме того, нами также были изготовлены волоконные интерферометры Фабри–Перо с радиусами изгиба световода  $10.1$  и  $5$  мм, при которых резонансной связи мод, согласно данным рис.2, не наблюдается.

Зеркальные покрытия (пленки из сплава золота с палладием) наносились на торцы отрезков световодов методом ионного вакуумного напыления. При выборе толщины напыляемых покрытий мы исходили из необходимости достижения высокой добротности резонатора, что обеспечивается увеличением коэффициентов отражения зеркал и, как следствие, толщины отражающих покрытий. Однако чрезмерное увеличение толщины входного по-

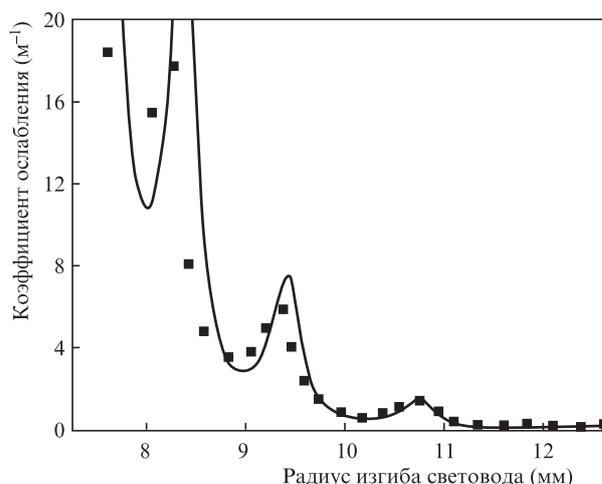


Рис.2. Зависимость коэффициента ослабления мощности направляемого излучения от радиуса изгиба одномодового волоконного световода. Сплошная кривая – расчет с использованием формулы (1), точки – результаты экспериментов.

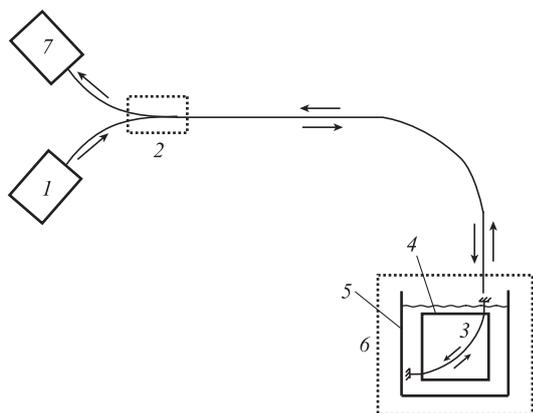
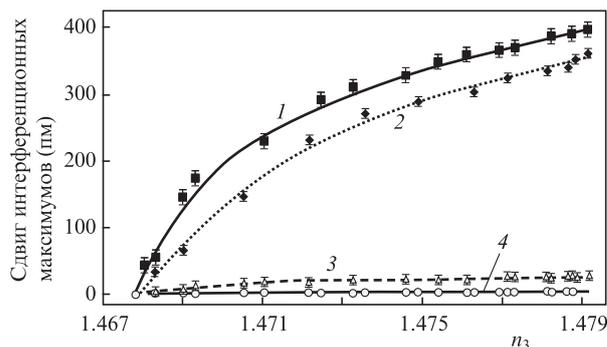


Рис.3. Схема экспериментальной установки:

1 – стабилизированный суперлюминесцентный диод с центральной длиной волны 1550 нм; 2 – волоконно-оптический Y-разветвитель; 3 – изогнутый волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо; 4 – подложка; 5 – емкость, заполненная жидкостью с исследуемым показателем преломления; 6 – термостат; 7 – анализатор оптического спектра.

крытия, через которое излучение вводится в резонатор интерферометра, может привести к возрастанию потерь мощности излучения, а следовательно, к ограничению чувствительности интерферометра к изменению величины  $n_3$ . Поэтому толщина входного зеркала  $h$  была выбрана равной 40 нм, что обеспечило коэффициент отражения по интенсивности  $r^2 \sim 50\%$ ; выходное зеркало имело толщину  $h = 60$  нм и  $r^2 \sim 98\%$ .

Исследования зависимости смещения спектральных максимумов в изогнутом интерферометре Фабри–Перо от показателя преломления внешней среды проводились на установке, схема которой представлена на рис.3. Излучение стабилизированного суперлюминесцентного диода с центральной длиной волны 1550 нм 1 вводилось в жестко закрепленный на подложке 4 изогнутый волоконный резонатор Фабри–Перо 3, помещенный в емкость с жидкостью 5. Результаты измерения зависимости сдвига спектральных максимумов  $\Delta\lambda$  в данном интерферометре от показателя преломления жидкости  $n_3$  представлены на рис.4. Видно, что значительные сдвиги этих максимумов наблюдаются при обеспечении условий резонансной связи между модой сердцевины и модами оптической оболочки интерферометра (кривые 1, 2). В случае же отсутствия резонансной связи мод изменение величины  $n_3$  почти не оказывает влияния на спектр излучения, распространяющегося в сердцевине волоконного интерферометра (кривые 3, 4). Крутизна зависимости  $\Delta\lambda(n_3)$ , наблюдаемой при наличии резонансной связи между модами сердцевины и оптической оболочки в волоконном интерферометре Фабри–Перо, максимальна на участке, где показатель преломления жидкости  $n_3$  наиболее близок к показателю преломления оболочки световода  $n_2$ . Для кривой 1 крутизна  $\gamma = d\lambda/(\lambda dn_3) = 0.077$ . Соответствующая этому значению фазовая чувствительность основной моды, приведенная на единицу длины  $l$  световода,  $\xi = \lambda d\phi/(l dn_3) = 0.71$ . Такие значения позволяют зарегистрировать минимальное изменение показателя преломления внешней среды, равное  $5 \times 10^{-6}$ . Это значение может быть еще уменьшено путем увеличения длины интерферометра, например при использовании многовитковых схем. Из пред-

Рис.4. Зависимости сдвига интерференционных максимумов в волоконно-оптическом интерферометре Фабри–Перо от показателя преломления внешней среды  $n_3$  при радиусе изгиба интерферометра  $R = 9.4$  мм (1), 10.7 мм (2), 10.1 мм (3) и 5 м (4).

ставленных на рис.4 данных следует, что значения  $\gamma$  и  $\xi$  постепенно снижаются с ростом  $n_3$  и при  $n_3 = 1.479$  становятся приблизительно на порядок меньше. По-видимому, это связано с ослаблением процессов взаимного влияния мод сердцевины и оболочки с ростом разности показателей преломления оптической оболочки и внешней среды. Это предположение подтверждается аналогичным характером зависимости амплитуды основной моды одномодового волоконного световода от  $n_3$ . Действительно, из выражения (1) непосредственно следует, что в случае резонансной связи основной и оболочечных мод данная зависимость имеет максимальную крутизну при  $n_3 \approx n_2$ , причем эта крутизна уменьшается с ростом  $n_3$ .

Таким образом, в работе показано, что фаза излучения, направляемого по изогнутому волоконному световоду, изменяется в зависимости от показателя преломления внешней среды при обеспечении в нем резонансной связи направляемой моды сердцевины с модами оптической оболочки. Это приводит к соответствующему сдвигу спектральных максимумов в изогнутом волоконном интерферометре Фабри–Перо. Максимальные достигнутые фазовая и спектральная чувствительности изогнутого интерферометра Фабри–Перо составляют соответственно 0.71 и 0.077. Такие характеристики позволяют зарегистрировать минимальное изменение показателя преломления внешней среды, равное  $5 \times 10^{-6}$ . Это делает предложенный подход измерения перспективным с точки зрения создания прецизионных высокостабильных сенсоров показателя преломления, используемых для решения широкого круга задач рефрактометрии жидких сред.

1. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973).
2. Иоффе Б.В. *Рефрактометрические методы химии* (Л.: Химия, 1974).
3. Homola J., Yee S.S. *Sens. Actuators B*, **54**, 3 (1999).
4. Kuzyk M.G. *Polymer Fiber Optics: Materials, Physics, and Applications* (Boca Raton: CRC Press, 2006).
5. Liang W., Huang Y.Y., Xu Y., Lee R.K., Yariv A. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 151122 (2005).
6. Villatoro J., Monzón-Hernández D. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 1409 (2006).
7. Lu P., Men L., Sooley K., Chen Q. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 131110 (2009).
8. Wei T., Han Y., Li Y., Tsai H.-L., Xiao H. *Opt. Express*, **16**, 5764 (2008).
9. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С., Медведков О.И., Протопопов В.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 151 (1997).
10. Wang P., Semenova Yu., Wu Q., Farrell G., Ti Yu., Zheng J. *Appl. Opt.*, **48**, 31 (2009).
11. Faustini L., Martini G. *J. Lightwave Technol.*, **15**, 671 (1997).