

09.5

Поверхностный плазмонный резонанс в металлизированном одномодовом световоде с пониженной приведенной частотой

© А.В. Дышлюк^{1,2}, О.Б. Витрик^{1,2}, Lu Guohui³, Ю.Н. Кульчин^{1,2}

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

² Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

³ Heilongjiang university, 74 Xuefu Road, Nangang District, Harbin, China
E-mail: anton_dys@iacp.dvo.ru

Поступило в Редакцию 28 января 2015 г.

Численно исследованы процессы возбуждения поверхностного плазмонного резонанса в изогнутом металлизированном одномодовом световоде с пониженной приведенной частотой. Установлено, что при оптимальном сочетании приведенной частоты, радиуса изгиба и толщины металлической пленки реализуется прямая передача энергии распространяющегося по сердцевине излучения плазмон-поляритонной волне, возбуждаемой на поверхности металлической пленки, нанесенной на оптическую оболочку световода. Показано, что данный эффект обеспечивает возможность высокоточного измерения показателя преломления (ПП) со спектральной чувствительностью $70 \mu\text{m}/\text{u}$ ПП и разрешением $3 \cdot 10^{-7}$.

Биосенсорные системы на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) благодаря чрезвычайно высокой чувствительности и отсутствию необходимости использования флуоресцентных маркеров получают все более широкое распространение для решения задач молекулярной биологии и биохимии, медицины, фармакологии, экологического мониторинга, химической и пищевой промышленности [1–5]. Чувствительные элементы таких систем используют плазмонные колебания, возникающие на границе раздела металл/диэлектрик, для регистрации вариаций показателя преломления (ПП) с разрешением до 10^{-8} – 10^{-9} единиц показателя преломления (RIU — refractive index unit) [5]. Одним из наиболее перспективных типов рефрактометрических

датчиков на основе плазмонного резонанса представляются волоконно-оптические ППР-сенсоры, которые обеспечивают варьируемую длину измерительной базы чувствительного элемента, отсутствие необходимости юстировки оптических элементов, возможность миниатюризации, проведения удаленных измерений и в перспективе значительного снижения стоимости биосенсорных систем на основе ППР [1,6].

Как правило, волоконно-оптические ППР-сенсоры выполняются на многомодовых волоконных световодах (ВС) с полимерной оболочкой или на кварц/кварцевых одномодовых волоконных световодах [6]. В первом случае полимерная оболочка может быть легко удалена, и поверхность раздела металл/диэлектрик формируется при напылении металлической пленки непосредственно на сердцевину световода, по которой распространяется возбуждающее ППР-излучение. Процедура изготовления таких датчиков предельно проста, однако многомодовый режим работы световода приводит к снижению их метрологических характеристик [5]. Значительно лучшие результаты достигаются при использовании одномодовых световодов, но в кварц/кварцевом одномодовом световоде направляемое по 8-микронной сердцевине излучение отделено от окружающей среды 60-микронным слоем кварцевой оболочки. Поэтому для обеспечения взаимодействия фундаментальной моды с металлической пленкой, как правило, прибегают к удалению части оптической оболочки механическим или химическим способом, после чего пленка может быть сформирована в непосредственной близости от сердцевины световода [4–6]. Процедура изготовления таких датчиков, называемых ППР-сенсорами D-типа, относительно сложна; кроме того, нарушение структурной целостности световода может повлечь снижение механической прочности, долговечности и надежности датчика.

В работах [7–9] был предложен новый подход к созданию волоконно-оптических ППР-сенсоров, в котором металлическая пленка наносится непосредственно на оптическую оболочку стандартного одномодового световода. Взаимодействие направляемой по сердцевине фундаментальной моды с пленкой реализуется в этом случае за счет изгиба световода — через посредство мод шепчущей галереи, распространяющихся в оболочке изогнутого ВС и при определенных радиусах изгиба, сильно связанных с фундаментальной модой. Такая конфигурация исключает необходимость нарушения целостности световода, а также позволяет значительно повысить разрешение рефрактометриче-

ских измерений по сравнению с известными волоконно-оптическими ППР-рефрактометрами [8,9]. Однако взаимодействие фундаментальной моды с металлической пленкой, нанесенной на оболочку изогнутого одномодового световода, может быть реализовано и напрямую, если поле фундаментальной моды в достаточной степени проникает в оболочку. Этого можно добиться либо уменьшая радиус изгиба ВС, что сопряжено с риском повреждения световода, либо понижая его приведенную частоту. В последнем случае фундаментальная мода слабо удерживается сердцевинной, и даже при небольшом изгибе световода оказывается возможным обеспечить прямую передачу энергии направляемого излучения поверхностным плазмон-поляритонным волнам, распространяющимся в металлическом покрытии оболочки. Численному исследованию такого подхода к возбуждению плазмонного резонанса в изогнутом одномодовом световоде с металлизированной оболочкой и посвящена данная работа.

Схема исследуемого световода, состоящего из кварцевой сердцевины (ПП — n_1), кварцевой оболочки (ПП — n_2) и полимерного покрытия, приведена на рис. 1. Чувствительный участок 2 очищается от полимерного покрытия, покрывается тонкой пленкой серебра 7, изгибается с постоянным радиусом кривизны R и помещается в среду с подлежащим измерению показателем преломления n_3 , который, как полагается, находится в диапазоне 1.33–1.44, что соответствует ПП многих широко используемых в биосенсорике растворителей. Излучение вводится и выводится из изогнутого участка через прямые отрезки того же световода — 1 и 3, которые из-за сохраненного полимерного покрытия 6 нечувствительны к величине n_3 . В качестве рабочего спектрального диапазона выбран стандартный для волоконной оптики диапазон длин волн в окрестности $1.55 \mu\text{m}$.

Для моделирования распространения излучения по исследуемой волноводной структуре используется метод разложения по направляемым модам (Eigenmode Expansion EME) [10,11]. Численный анализ показывает, что определяющую роль в процессах возбуждения плазмон-поляритонных волн играют меридиональные моды участка 2, поэтому для упрощения расчетов цилиндрический волоконный световод со ступенчатым профилем ПП при помощи метода эффективного показателя преломления (Effective Index Method [12]) заменяется на эквивалентный планарный световод с градиентным профилем ПП, моды которого хорошо аппроксимируют меридиональные моды ВС [10]. Для иллюстрации

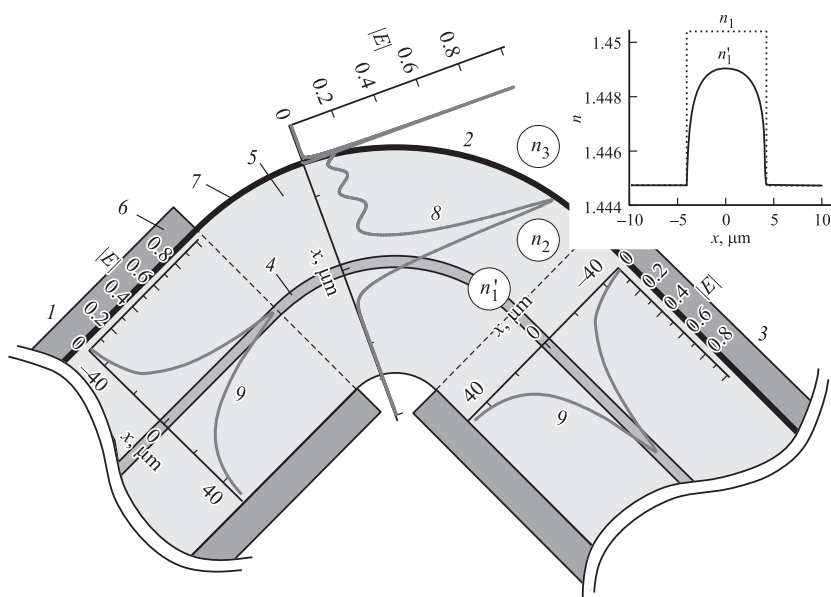


Рис. 1. Схема исследуемого одномодового световода и его моды: 1 — прямой участок на входе, 2 — изогнутый чувствительный участок, 3 — прямой участок на выходе, 4 — сердцевина световода, 5 — оболочка световода, 6 — полимерное покрытие, 7 — металлическая пленка, 8 — амплитудный профиль одной из двух мод изогнутого участка, ответственных за передачу энергии направляемого по сердцевине излучения поверхностным плазмонам (профиль второй моды подобен данному и на рисунке не показан), 9 — профиль амплитуды электрического поля фундаментальной моды участков 1 и 3. Вставка — профиль ПП стандартного одномодового волоконного световода и эффективный градиентный профиль эквивалентного планарного световода (n'_1).

данного подхода на вставке рис. 1 приведен градиентный профиль планарного световода, рассчитанный для стандартного одномодового ВС типа SMF-28.

Расчет модового состава эквивалентного планарного световода показывает, что, как и следовало ожидать, направляемое излучение в участках 1 и 3 представлено единственной фундаментальной модой (рис. 1, кривые 9). Металлизированный участок 2, вообще говоря,

поддерживает большое количество мод, однако в процессе прямой передачи энергии направляемого излучения поверхностным плазмонам на резонансной длине волны участвуют только две из них. Амплитудные профили данных мод практически одинаковы и в области сердцевины подобны профилю фундаментальной моды прямого световода, что предполагает их высокую эффективность возбуждения фундаментальной модой участка I , а на границе раздела металл–внешняя среда содержат выраженный пик, указывающий на возбуждение плазмонного резонанса (рис. 1, кривая 8). Обе моды имеют высокое затухание вследствие потерь энергии на возбуждение плазмон-поляритонных волн, близкие постоянные распространения и существенно различные фазовые профили, которые для простоты на рисунке не приводятся.

Результаты расчетов показывают, что при использовании одномодовых световодов со стандартным значением приведенной частоты, например, световода SMF-28 ($V \sim 2$ при $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) такие моды в модовом спектре участка 2 не возникают даже при изгибах с большой кривизной ($R = 8 \text{ mm}$ и менее), в то время как в световодах с более низкой приведенной частотой ($V = 0.7\text{--}0.8$) они появляются уже при достаточно больших радиусах изгиба, порядка нескольких сантиметров. С учетом данных результатов при моделировании использовались параметры световода Thorlabs SM800: $n_1 = 1.449$, $n_2 = 1.444$, $\rho = 1.6 \mu\text{m}$, $V = 0.7783$ (при $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$), где ρ — радиус сердцевины ВС. На рис. 1, кривая 8 приведен характерный профиль амплитуды электрического поля одной из рассматриваемых мод, рассчитанный на резонансной длине волны для световода SM800 при $R = 7 \text{ cm}$. Отметим, что в отличие от случая, исследованного в работах [8,9], когда энергия распространяющегося по сердцевине излучения передается плазмон-поляритонной волне через посредство оболочечных мод, в данном случае, как видно из рисунка, поле рассматриваемых мод локализуется преимущественно в области сердцевины и металлической пленки, а в оболочке амплитуда электрического поля не достигает больших значений. Это указывает на прямой характер взаимодействия фундаментальной моды с плазмон-поляритонной волной и незначительную роль оболочечных мод в процессах возбуждения плазмонного резонанса в исследуемой структуре.

Коэффициент пропускания всей исследуемой структуры вычисляется в виде отношения мощностей ФМ в участках 3 и 1. Поскольку моды участка 2 имеют значительные омические потери, при анализе переход-

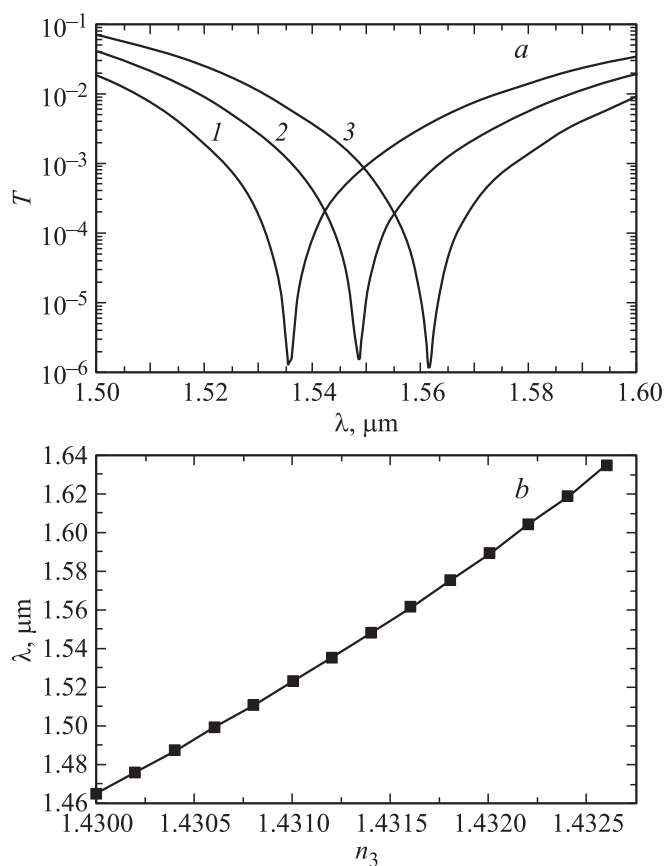


Рис. 2. Расчетные результаты: a — спектр пропускания исследуемой структуры при $n_3 = 1.4312$ (1), 1.4314 (2), 1.4316 (3); b — зависимость длины волны ППР от показателя преломления внешней среды.

ных процессов между участками, как и в работах [8,9], используется несопряженная формулировка условия ортогональности мод [11,13].

Результаты расчетов показывают, что, как и следовало ожидать, в спектре пропускания исследуемой структуры присутствует провал на длине волны плазмонного резонанса (рис. 2, a). Полуширина провала

$\Delta\lambda$ (по уровню 3 dB от максимального ослабления) сильно зависит от длины чувствительного участка L и толщины металлической пленки d и достигает минимума при $L = 2$ см и $d = 37$ нм, которые и были выбраны в качестве оптимальных значений.

На рис. 2, *a* приведены результаты расчета спектра пропускания исследуемой структуры для трех значений показателя преломления внешней среды $n_3 = 1.4312, 1.4314, 1.4316$, полученные при оптимальных значениях параметров d и L . Видно, что длина волны ППР λ_{SP} сильно зависит от n_3 , при этом зависимость $\lambda_{SP}(n_3)$ близка к линейной, как это иллюстрирует рис. 2, *b*. Из рисунка также следует, что спектральная чувствительность в данном случае составляет $\sim 70 \mu\text{m}/\text{RIU}$, что значительно превышает аналогичные характеристики большинства известных волоконно-оптических рефрактометров на основе ППР [1,4,5,14]. В частности, такая чувствительность более чем в 3 раза выше, чем соответствующая оценка, полученная в работах [8,9] для случая, когда плазмонный резонанс в изогнутом одномодовом световоде с металлизированной оболочкой возбуждается через посредство оболочечных мод шепчущей галереи. Полагая разрешение анализатора спектра равным 0.02 нм, разрешение рефрактометрических измерений, которое может быть получено с использованием исследуемой структуры, можно оценить как $3 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, в работе численно исследованы процессы возбуждения поверхностного плазмонного резонанса в изогнутом металлизированном световоде с пониженной приведенной частотой. Показано, что при оптимальном сочетании приведенной частоты, радиуса изгиба и толщины металлической пленки реализуется прямая передача энергии распространяющегося по сердцевине излучения плазмон-поляритонной волне, распространяющейся вдоль поверхности металлической пленки, нанесенной на оптическую оболочку световода. Установлено, что данный эффект обеспечивает возможность рефрактометрических измерений со спектральной чувствительностью $\sim 70 \mu\text{m}/\text{EPP}$, что значительно выше, чем типичные характеристики волоконно-оптических ППР-рефрактометров, и более чем в 3 раза превышает чувствительность, которая может быть получена при обеспечении связи между фундаментальной и плазмон-поляритонной модами через посредство оболочечной моды шепчущей галереи [8,9]. Разрешение рефрактометрических измерений, достижимое с использованием исследованной структуры, оценивается в $3 \cdot 10^{-7}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по постановлению П218, договор № 02.G25.31.0116 от 14.08.2014 между Открытым акционерным обществом «Центр судоремонта „Дальзавод“» и Министерством образования и науки Российской Федерации, а также грантов ДВО РАН (15-И-7-009, 15-И-4-20, RUSPLUS_S&T-048).

Список литературы

- [1] Guo X. // *J. Biophotonics*. 2012. V. 5 (7). P. 483–501.
- [2] Chen Y, Ming H. // *Photonic Sensors*. 2012. V. 2 (1). P. 37–49.
- [3] Zijlstra P, Paulo P.M.R., Orrit M. // *Nature Nanotechnology*. 2012. V. 7. P. 379–382.
- [4] Xiao G, Bock W.J. (ed.). *Photonic Sensing: Principles and Applications for Safety and Security Monitoring*. Wiley, 2012. 336 p.
- [5] Homola J. *Surface Plasmon Resonance Based Sensors*. Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors. 2006. 251 p.
- [6] Gupta B.D., Verma R.K. // *J. Sensors*. 2009. V 1. ID 979761. P. 1.
- [7] Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Zhou Zh. // *Laser Physics*. 2013. V. 23 (8). P. 085 105–085 109.
- [8] Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. // *Opt. Express*. 2014. V. 22. P. 22 196–22 201.
- [9] Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Гурбатов С.О., Гуоши Лу // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40 (24). С. 39–46.
- [10] Gallagher D., Felici T. // *SPIE Proc.* 2003. V. 4987. P. 69–82.
- [11] Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волноводов*. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
- [12] Chiang K.S. // *Applied Optics*. 1986. V. 25 (3). P. 348–354.
- [13] Sammut R., Snyder A.W. // *Applied Optics*. 1976. V. 15 (4). P. 1040–1044.
- [14] Verma R.K., Gupta B.D. // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2010. V. 27. P. 846–851.