

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**Сравнительный анализ волноводных плазмон-поляритонных рефрактометров на основе возбуждения поверхностной, симметричной и антисимметричной плазмонных мод**

А.В.Дышлок, О.Б.Витрик, Ю.Н.Кульчин

Представлены результаты численного исследования трех конфигураций волноводного рефрактометра на основе поверхностного плазмонного резонанса: рефрактометр без буферного слоя на основе возбуждения поверхностной плазмонной моды, а также рефрактометры с буферным слоем на основе возбуждения симметричной и антисимметричной плазмонных мод. Установлено, что наилучшими метрологическими характеристиками обладает рефрактометр на симметричной плазмонной моде: выигрыш по совокупности спектральной чувствительности и ширины резонансного провала достигает двух порядков величины по сравнению с рефрактометром на антисимметричной плазмонной моде и одного порядка – по сравнению с рефрактометром без буферного слоя. С точки зрения измерения локальных вариаций показателя преломления в тонком слое преимущество от использования симметричной плазмонной моды менее выражено и составляет примерно 20 и 6 соответственно. Показано, что более высокие метрологические характеристики рефрактометра на симметричной плазмонной моде достигаются в ущерб его компактности: длина чувствительного участка в таком рефрактометре может на три порядка превышать аналогичную характеристику для рефрактометров без буферного слоя и на антисимметричной плазмонной моде. Минимальная длина чувствительного участка достигается в рефрактометре на антисимметричной плазмонной моде, который, однако, обладает наилучшими метрологическими характеристиками. Что касается простоты изготовления, то наиболее привлекательной является схема без буферного слоя, которая занимает промежуточное положение между рефрактометрами на симметричной и антисимметричной плазмонных модах как по метрологическим параметрам, так и по длине чувствительного участка.

Ключевые слова: *поверхностный плазмонный резонанс, волноводный плазмон-поляритонный рефрактометр, симметричная плазмонная мода, антисимметричная плазмонная мода, хемосенсорика, биосенсорика.*

1. Введение

Рефрактометрические сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) представляют перспективное направление развития современной био- и хемосенсорики [1–6]. Датчики данного типа используют резонансное возбуждение поверхностных плазмон-поляритонных волн – связанных колебаний электронной плотности и электромагнитного поля, возникающих на границе раздела между металлом и диэлектриком – для высокоточного измерения показателя преломления (ПП) вблизи границы раздела [5, 6]. Наиболее распространенной схемой построения ППР-рефрактометра является конфигурация Кречмана, в которой поверхностные плазмоны возбуждаются пучком света, падающим изнутри призмы на ее металлизированную грань под углом, превышающим угол полного внутреннего отражения [5, 6]. При выполнении условия фазового синхронизма между возбуждающим пучком и плазмонной волной полное внутреннее отражение нарушается, и энергия падающего пучка передается поверхностным плазмонам. Это приводит к формированию ре-

зонансного провала в угловом (или частотном) спектре отраженного света, положение которого сильно зависит от показателя преломления среды вблизи металлической пленки, что и обеспечивает возможность рефрактометрических измерений. Для использования такого рефрактометра в качестве био- или хемосенсора на поверхности металлической пленки наносится слой молекул-лигандов – рецепторов, способных вступать в реакцию с определенным типом молекул-аналитов [5, 6]. Реакция ассоциации между лигандом и аналитом приводит к локальному изменению показателя преломления вблизи металлической пленки и может быть обнаружена по смещению резонансного провала в спектре регистрируемого сигнала.

Схема Кречмана хорошо отработана и находит широкое применение в лабораторных биохимических исследованиях, однако она плохо подходит для создания компактных, портативных и недорогих биосенсорных устройств, в том числе одноразовых и предназначенных для использования в полевых условиях. Поэтому большое внимание исследователей привлекают волноводные ППР-рефрактометры, в которых плазмон-поляритонные волны возбуждаются излучением, распространяющимся по диэлектрическим волноводам [6–9]. Датчики этого типа, в отличие от конфигурации Кречмана, обеспечивают миниатюризацию и сопряжение сенсорных устройств с элементами волоконной и интегральной оптики, проведение измерений в труднодоступных местах, а также снижение стоимости плазмон-поляритонных био- и хемосенсорных систем [6–9].

Существуют различные схемы построения волноводных плазмон-поляритонных рефрактометров. Наиболее

А.В.Дышлок. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8; Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Россия, 690014 Владивосток, ул. Гоголя, 41; e-mail: anton_dys@iacp.dvo.ru

О.Б.Витрик, Ю.Н.Кульчин. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: oleg_vitrik@mail.ru

Поступила в редакцию 12 мая 2018 г.

простой является конфигурация, представляющая собой волноводный аналог схемы Кречмана, в которой металлическая пленка наносится непосредственно на световодную сердцевину волновода [6]. Известны также схемы с промежуточным слоем между сердцевиной и металлической пленкой. В последнем случае ППР-рефрактометр может работать на возбуждении как симметричной плазмонной моды (СПМ) (symmetric surface plasmon, или long-range surface plasmon), так и антисимметричной плазмонной моды (АСПМ) (antisymmetric surface plasmon, short-range surface plasmon), которые возникают в результате гибридизации плазмонных волн, распространяющихся по разным сторонам тонкой металлической пленки [6].

Отметим, что в ППР-рефрактометре без буферного слоя, как и в схеме Кречмана, ПП волноводного слоя, как правило, существенно превышает ПП внешней среды. По этой причине постоянные распространения плазмонных мод, распространяющихся по разным сторонам металлической пленки, сильно различаются, и даже при малой толщине пленки гибридизация между ними практически не происходит. Возбуждаемая плазмонная мода в этом случае локализована на границе раздела металл–внешняя среда и близка по своим характеристикам к плазмонной моде на поверхности объемного металла, поэтому далее она будет называться поверхностной плазмонной модой (ППМ).

Симметричная, антисимметричная и поверхностная плазмонные моды существенно различаются постоянными распространения, затуханием, степенью локализации поля и чувствительностью к показателю преломления внешней среды [6]. По вопросу, какая из данных мод в наибольшей степени подходит для создания ППР-рефра-

ктометра, в литературе отсутствует общепринятое мнение. Авторы, предлагающие конфигурации волноводных ППР-рефрактометров на основе СПМ, указывают на их более низкие потери и, соответственно, более узкий резонансный провал в спектре регистрируемого сигнала и более высокую спектральную чувствительность [10–12]. В других работах подчеркиваются более высокая степень локализации поля антисимметричной моды и ее высокие потери, что обеспечивает более высокую чувствительность к локальным изменениям ПП в тонком слое и минимальные размеры чувствительного элемента [13–14]. В работе [6] приводится подробное количественное сравнение ППМ, СПМ и АСПМ с точки зрения их использования для построения ППР-рефрактометра по схеме Кречмана. Однако для волноводных плазмон-поляритонных рефрактометров аналогичное сравнение, насколько нам известно, не проводилось.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ волноводных плазмон-поляритонных рефрактометров на основе возбуждения поверхностной, симметричной и антисимметричной плазмонных мод.

2. Объект и методы исследования

Объект исследования составляют три конфигурации волноводного ППР-рефрактометра: без буферного слоя (рис.1,а); с буферным слоем на симметричной и антисимметричной плазмонных модах (рис.1,б). Во всех трех случаях рефрактометр образован тремя участками: 1, 3 – входной и выходной участки в виде исходного волновода без металлической пленки; 2 – чувствительный металлизированный участок. Металлическая пленка контактирует с

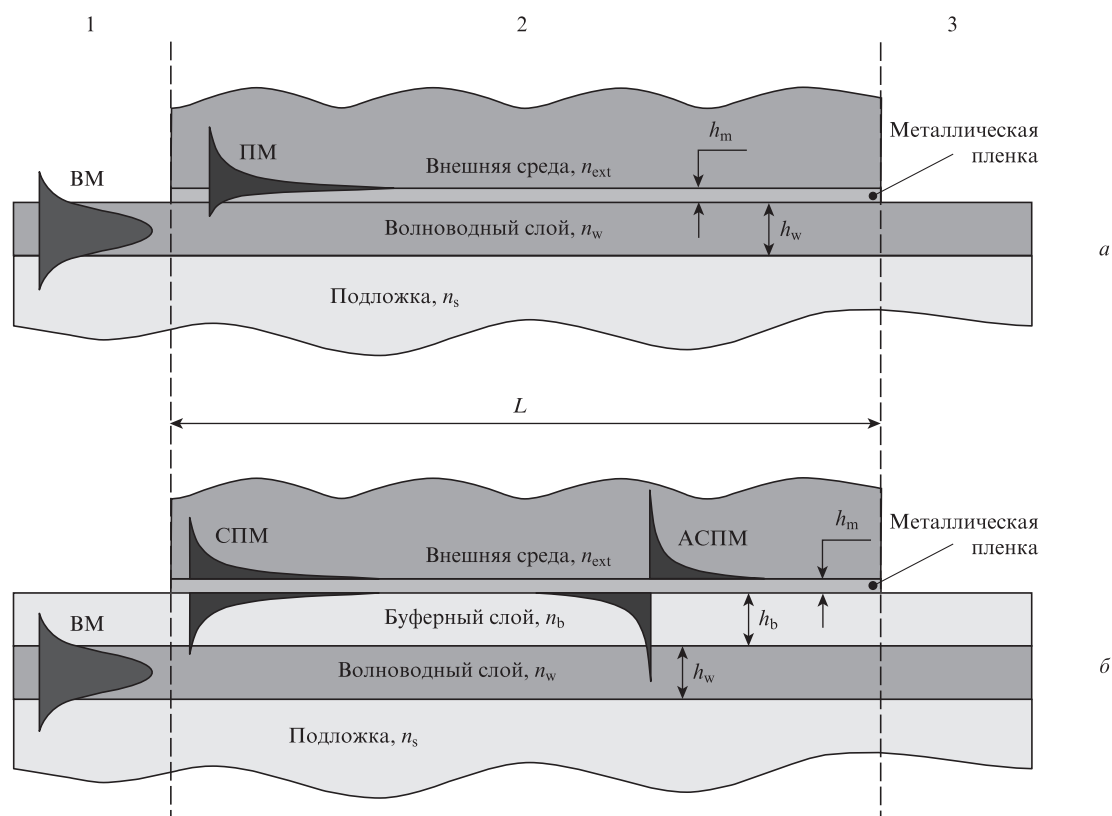


Рис.1. Схематическое изображение исследуемых структур: ППР-рефрактометра без буферного слоя на основе возбуждения поверхностной плазмонной моды (а) и ППР-рефрактометра с буферным слоем на основе возбуждения симметричной и антисимметричной плазмонных мод (б).

жидкой внешней средой, показатель преломления n_{ext} которой является измеряемой величиной и находится, как предполагается, в пределах примерно от 1.33 до 1.45. В качестве материала металлической пленки выбрано серебро, данные о комплексной диэлектрической проницаемости которого взяты из справочника [15]. Для обеспечения возможности возбуждения плазмон-поляритонных волн в металлической пленке направление поляризации электрического поля направляемого излучения выбирается в плоскости рис. 1.

Параметры волноводного слоя подбираются таким образом, чтобы он работал в одномодовом режиме, поэтому направляемое излучение в участках 1 и 3 описывается единственной фундаментальной модой выбранной поляризации.

Для анализа распространения света на участке 2 нами используются два различных подхода. В первом случае направляемое излучение представляется в виде суммы двух гибридных мод всей многослойной волноводной структуры. Во втором – направляемое излучение составляют более простые по своим свойствам волноводная и плазмонная моды, рассматриваемые по отдельности, а их взаимодействие, возникающее, когда их постоянные распространения совпадают или близки друг к другу, описывается теорией связанных мод и приводит к изменению их амплитуд по мере распространения [16]. Первый подход более удобен для проведения расчетов и используется для численного моделирования, а второй – физически более нагляден и применяется для предварительного анализа и интерпретации численных результатов.

Численное моделирование проводилось с применением коммерческого программного пакета Lumerical Mode Solutions™, при помощи которого вычислялись профили и постоянные распространения мод для каждого из трех участков (в том числе гибридных мод участка 2), амплитуды мод, возбуждаемых на границах между участками, распределение суммарного поля направляемого излучения в участке 2 и коэффициент пропускания всей структуры в виде отношения мощностей фундаментальных мод в участках 3 и 1. Для упрощения расчетов выбрана двухмерная геометрия задачи, соответствующая идеализированному планарному световоду, однако полученные результаты легко обобщаются на случай аналогичной интегрально-оптической волноводной структуры прямоугольного сечения, а также дают качественное представление о метрологических характеристиках аналогичных волоконно-оптических плазмон-поляритонных рефрактометров.

Материалы и геометрические параметры волноводной структуры во всех случаях выбираются таким образом, чтобы между волноводной и плазмонной модами, рассматриваемыми по отдельности, выполнялось условие фазового синхронизма на некоторой резонансной длине волны λ_{SPR} . Возникающая при этом связь между модами приводит к потерям направляемого излучения при $\lambda = \lambda_{\text{SPR}}$ вследствие передачи его энергии плазмонной волне и, таким образом, к формированию провала на резонансной длине волны в спектре пропускания всей структуры. При изменении ПП внешней среды постоянная распространения плазмонной моды изменяется, что приводит к смещению резонансного провала и, следовательно, обеспечивает возможность рефрактометрических измерений.

Основной метрологической характеристикой ППР-рефрактометра является спектральная чувствительность [6]

$$S_{\text{RI}} = \frac{d\lambda_{\text{SPR}}}{dn_{\text{ext}}} = \frac{d\lambda_{\text{SPR}}}{dn'_{\text{SP}}} \frac{dn'_{\text{SP}}}{dn_{\text{ext}}} = S_1 S_2,$$

где n'_{SP} – действительная часть эффективного показателя преломления (ЭПП) плазмонной моды; $S_1 = d\lambda_{\text{SPR}}/dn'_{\text{SP}} = [(dn_{\text{wg}}/d\lambda) - (dn'_{\text{SP}}/d\lambda)]^{-1}$ – инструментальная чувствительность, определяемая углом пересечения дисперсионных зависимостей волноводной и плазмонной мод; λ – длина волны; n_{wg} – ЭПП волноводной моды; $S_2 = dn'_{\text{SP}}/dn_{\text{ext}}$ – физическая чувствительность ЭПП плазмонной моды к показателю преломления внешней среды.

На разрешение рефрактометрических измерений кроме чувствительности влияют также ширина и глубина резонансного провала, уровень шумов измерительной системы и прочие факторы, однако для сравнения различных схем ППР-рефрактометров достаточно учесть, что разрешение σ обратно пропорционально спектральной чувствительности и контрасту провала, определяемому как отношение его глубины к ширине [6].

Поскольку в волноводных ППР-рефрактометрах ослабление на резонансной длине волны может достигать нескольких порядков величины и спектры пропускания удобно приводить в логарифмическом масштабе, в качестве меры ширины резонансного провала представляется целесообразным использовать не традиционную полуширину, а FWSRM (full width at square root minimum), соответствующую полуширине провала в логарифмическом масштабе. Данная полуширина, как показывают расчеты, увеличивается с ростом потерь плазмонной моды в окрестности λ_{SPR} и с уменьшением угла пересечения ее дисперсионной зависимости с соответствующей зависимостью волноводной моды.

Глубина резонансного провала определяется, в первую очередь, длиной чувствительного участка L . Наилучшее разрешение обеспечивается при наибольшей глубине провала, однако если последняя превышает динамический диапазон используемого анализатора спектра, то форма регистрируемого провала может искажаться вследствие воздействия шумов. С учетом этого, длина чувствительного участка во всех исследуемых конфигурациях выбиралась такой, чтобы максимальное ослабление на резонансной длине волны составляло ~ 80 дБ, что примерно соответствует динамическому диапазону современного оптического анализатора спектра (например, Yokogawa AQ6370D).

Таким образом, для сравнения различных конфигураций ППР-рефрактометров будем использовать параметр качества (Figure of Merit, FOM), определяемый как отношение спектральной чувствительности к логарифмической полуширине резонансного провала. Разрешение рефрактометрических измерений обратно пропорционально FOM, поэтому его наибольшее значение соответствует наилучшей конфигурации ППР-рефрактометра.

Важной характеристикой для био- и хемосенсорных применений является также глубина проникновения поля возбуждаемой плазмонной моды во внешнюю среду (d_{SP}), определяемая по уровню $1/e$ от максимальной интенсивности. Это связано с тем, что чувствительный слой молекул-лигандов может иметь толщину (d_{lig}) значительно меньше, чем указанная глубина проникновения. В этом случае, как показано в работе [6], целесообразно использовать понятие локальной чувствительности: $S_{\text{loc}} \propto S_{\text{RI}}(d_{\text{lig}}/d_{\text{SP}})$, которая учитывает чувствительность ЭПП плазмонной моды

к изменению показателя преломления в тонком слое вблизи металлической пленки.

С учетом вышесказанного, будем полагать, что разрешение рефрактометрических измерений в тонком чувствительном слое пропорционально так называемому коэффициенту локального разрешения (КЛР), который определим как отношение глубины проникновения d_{sp} к FOM и будем использовать для сравнения различных конфигураций ППР-рефрактометров по локальному разрешению (наименьшее значение КЛР соответствует наилучшей конфигурации).

3. Результаты исследования

3.1. ППР-рефрактометр без буферного слоя

С практической точки зрения при создании волноводного ППР-рефрактометра целесообразно использовать наиболее распространенные материалы, поэтому выберем SiO_2 ($n_s \approx 1.45$ [15]) в качестве материала подложки и

ПММА ($n_w \approx 1.49$ [17]) в качестве материала волноводного слоя. В этом случае, как показывают численные расчеты, при толщине волноводного слоя $h_w = 1.5$ мкм и показателе преломления внешней среды $n_{ext} = 1.4$ дисперсионные зависимости рассматриваемых по отдельности поверхностной плазмонной моды и волноводной моды (ВМ) пересекаются в ближнем инфракрасном диапазоне (рис.2,а, пунктирные кривые). Под рассматриваемой по отдельности ППМ подразумевается локализованная вблизи границы раздела металл–внешняя среда мода металлической пленки, контактирующей одной стороной с полубесконечной внешней средой, а другой стороной – с полубесконечным диэлектриком с показателем преломления n_w . Под волноводной модой понимается фундаментальная мода волноводного слоя, граничащего одной стороной с полубесконечной подложкой, а другой – с полубесконечной внешней средой.

В окрестности длины волны пересечения дисперсионных зависимостей ППМ и ВМ в соответствии с теорией связанных мод, при условии достаточно высокого коэф-

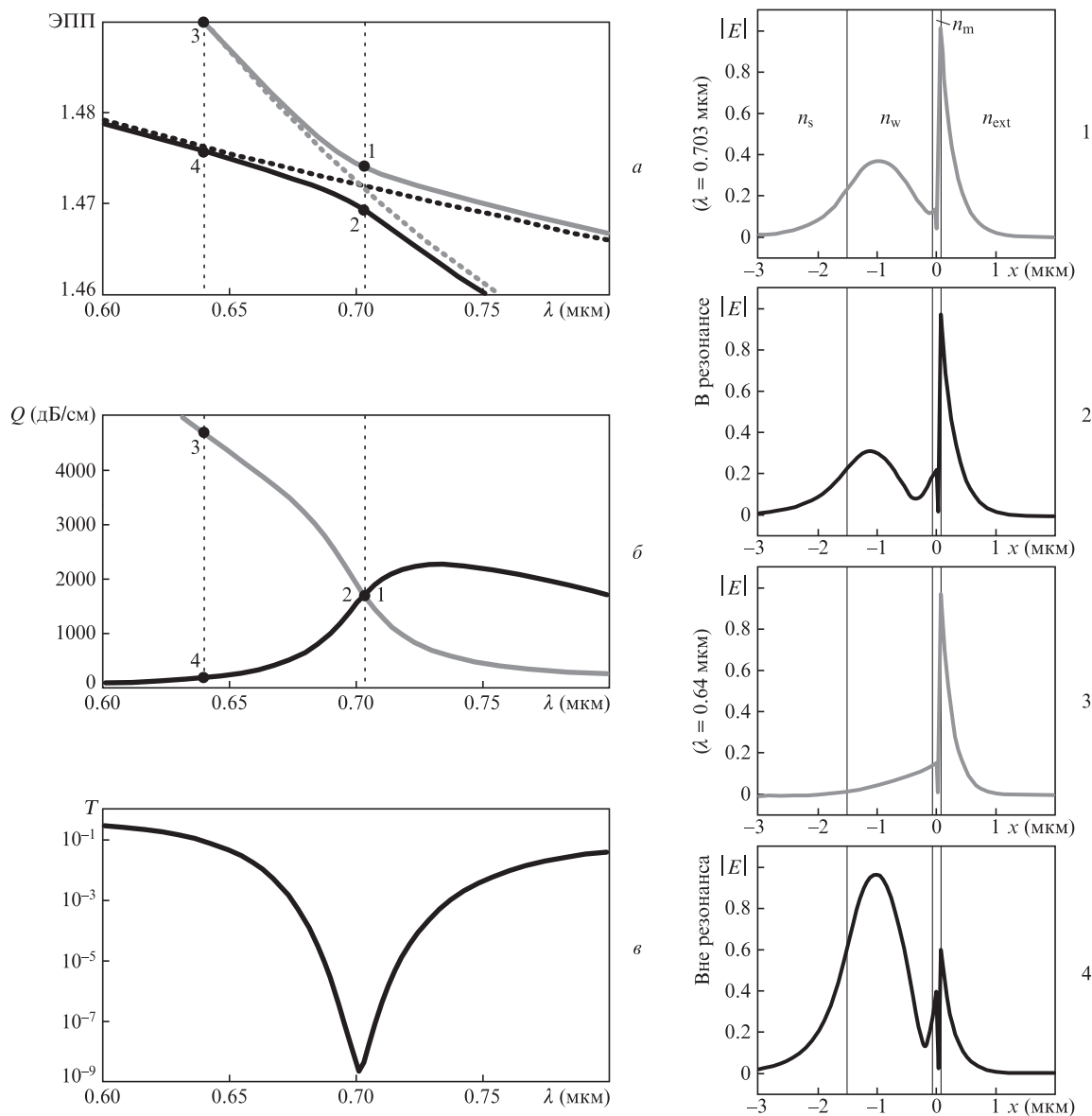


Рис.2. Спектральные зависимости эффективного показателя преломления (а) и потерь (б) гибридных мод металлизированного участка, а также спектр пропускания рефрактометра (в) при $h_m = 60$ нм, $n_{ext} = 1.4$, $L = 500$ мкм. Справа показаны профили ММС на резонансной ($\lambda = 0.703$ мкм, вставки 1, 2) и нерезонансной ($\lambda = 0.64$ мкм, вставки 3, 4) длинах волн.

фициента связи, в участке 2 могут возникать выраженные потери направляемого излучения вследствие передачи энергии направляемого излучения плазмонной волне. В частности, такие потери возникают при толщине металлической пленки $h_m = 60$ нм, что подтверждается представленными на рис.2 результатами расчета спектров ЭПП (рис.2,а, сплошные кривые), спектров потерь Q (рис.2,б) и профилей (вставки 1–4) гибридных мод многослойной структуры (ММС), образующей участок 2 (см. рис.1). Как видно из вставок 1 и 2, вблизи резонансной длины волны профили обеих ММС содержат элементы волноводной и плазмонной мод, рассматриваемых по отдельности, т.е. действительно представляют собой результат гибридизации последних. Поскольку профили ММС близки друг к другу, они имеют схожие интегралы перекрытия с профилем фундаментальной моды участка 1 и, следовательно, возбуждаются ею примерно с одинаковыми амплитудами. Их потери на данной длине волны одинаково велики (~ 1700 дБ/см) и приводят к ослаблению мощности

направляемого излучения примерно на 80 дБ при длине металлизированного участка $L = 0.5$ мм. В стороне от резонанса, как видно из рис.2,б и вставок 3 и 4, потери и профили ММС сильно различаются, причем только мода с низкими потерями имеет выраженный максимум в области волноводного слоя и, следовательно, эффективно возбуждается модой участка 1. В результате, существенного ослабления света на данной длине волны не происходит. Таким образом, в спектре пропускания рефрактометра возникает выраженный провал в окрестности резонансной длины волны (рис.2,в).

Численные расчеты показывают, что формирование резонансного провала в зависимости от толщины металлической пленки может проходить по двум различным сценариям. При толщине пленки 68 нм и менее в спектральных зависимостях ЭПП гибридных ММС имеет место антипересечение, а в спектрах потерь – пересечение, что иллюстрируется рис.2,а,б ($h_m = 60$ нм) и рис.3,а,б,е,д ($h_m = 45$ и 68 нм). При толщине пленки 69 нм и более –

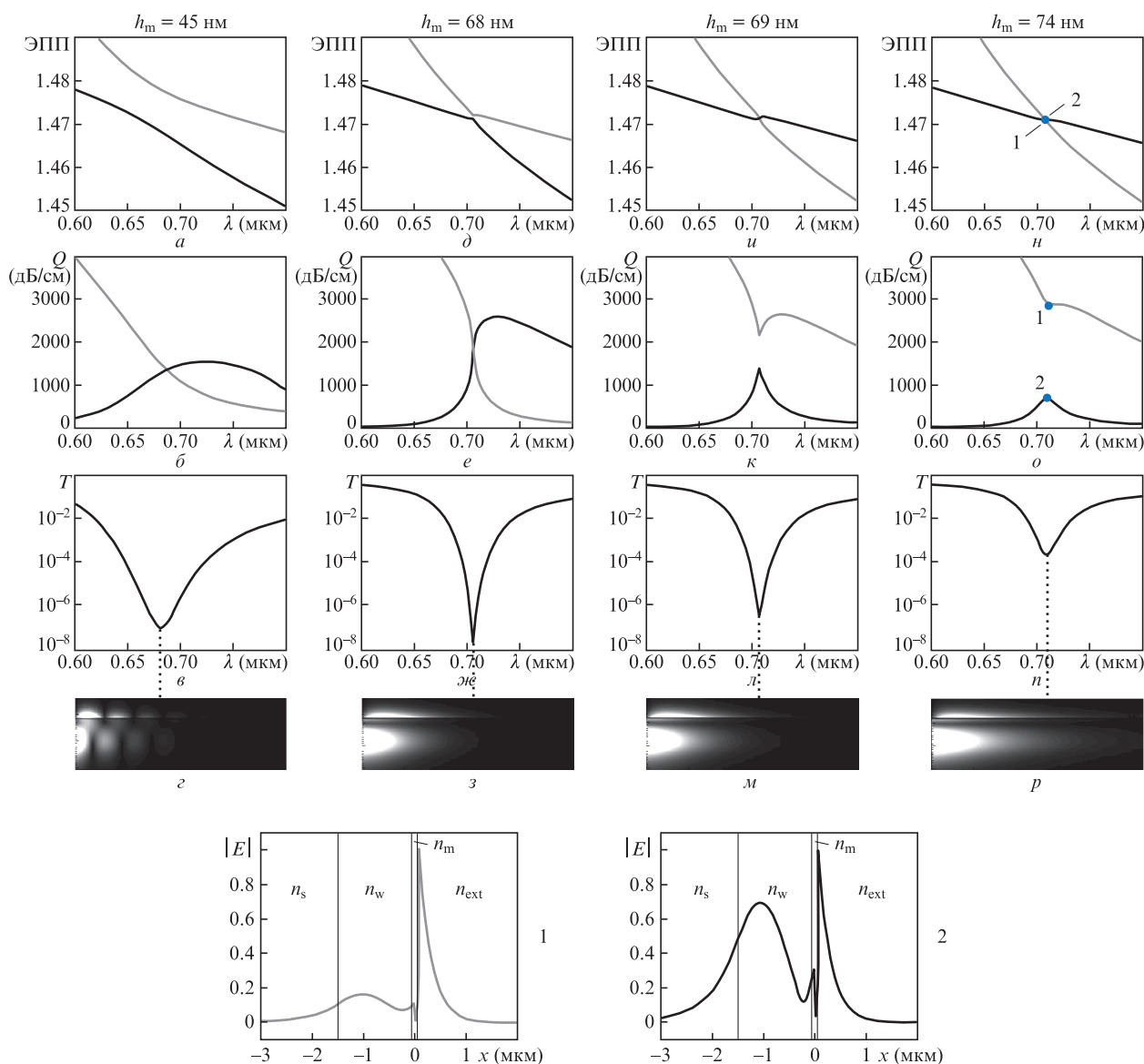


Рис.3. Дисперсионные зависимости гибридных ММС, спектры пропускания рефрактометра, а также распределение амплитуды электрического поля направляемого излучения в металлизированном участке на резонансной длине волны при $n_{ext} = 1.4$, $L = 500$ мкм и $h_m = 45$ нм (а, б, в, з), 68 нм (д, е, ж, з), 69 нм (и, к, л, м), 74 нм (н, о, п, р). На вставках 1, 2 показаны профили ММС на резонансной длине волны при $h_m = 74$ нм.

наоборот, в спектрах ЭПП наблюдается пересечение, тогда как спектры потерь не пересекаются (рис.3,и,к,н,о; $h_m = 69, 74$ нм).

Данным сценариям можно поставить в соответствие два различных режима связи между рассматриваемыми по отдельности ВМ и ППМ. Первый сценарий можно считать соответствующим режиму сильной связи, в котором между связанными модами на резонансной длине волны происходит периодический обмен мощностью. Это иллюстрируется представленным на рис.3,з распределением амплитуды электрического поля направляемого излучения в участке 2 при толщине пленки 45 нм. С точки зрения всей многослойной структуры, образующей участок 2, такой обмен соответствует интерференционным биениям гибридных ММС с периодом $\lambda/\Delta n$, где Δn – различие их ЭПП на резонансной длине волны. Отметим, что период биений увеличивается с ростом толщины пленки и, например, при $h_m = 68$ нм становится больше, чем характерная длина затухания направляемого излучения. В этом

случае обмен мощностью между ВМ и ППМ происходит настолько медленно, что он практически незаметен на фоне общего затухания света в участке 2 (рис.3,з; $h_m = 68$ нм).

Второму сценарию гибридизации можно поставить в соответствие режим слабой связи, в котором на резонансной длине волны периодического обмена мощностью между волноводной и плазмонной модами не происходит. С точки зрения ММС это соответствует ситуации, когда интерференционные биения между ними не возникают в силу равенства их постоянных распространения.

Подчеркнем, что термины «сильная связь» и «слабая связь» в контексте данной статьи понимаются иначе, чем в случае связи мод без потерь, и оба термина относятся к резонансной длине волны, на которой действительные части постоянных распространения связывающихся мод в точности совпадают.

Из теории связанных мод следует [16], что режим связи между волноводной и плазмонной модами определяется соотношением между коэффициентом связи D и разно-

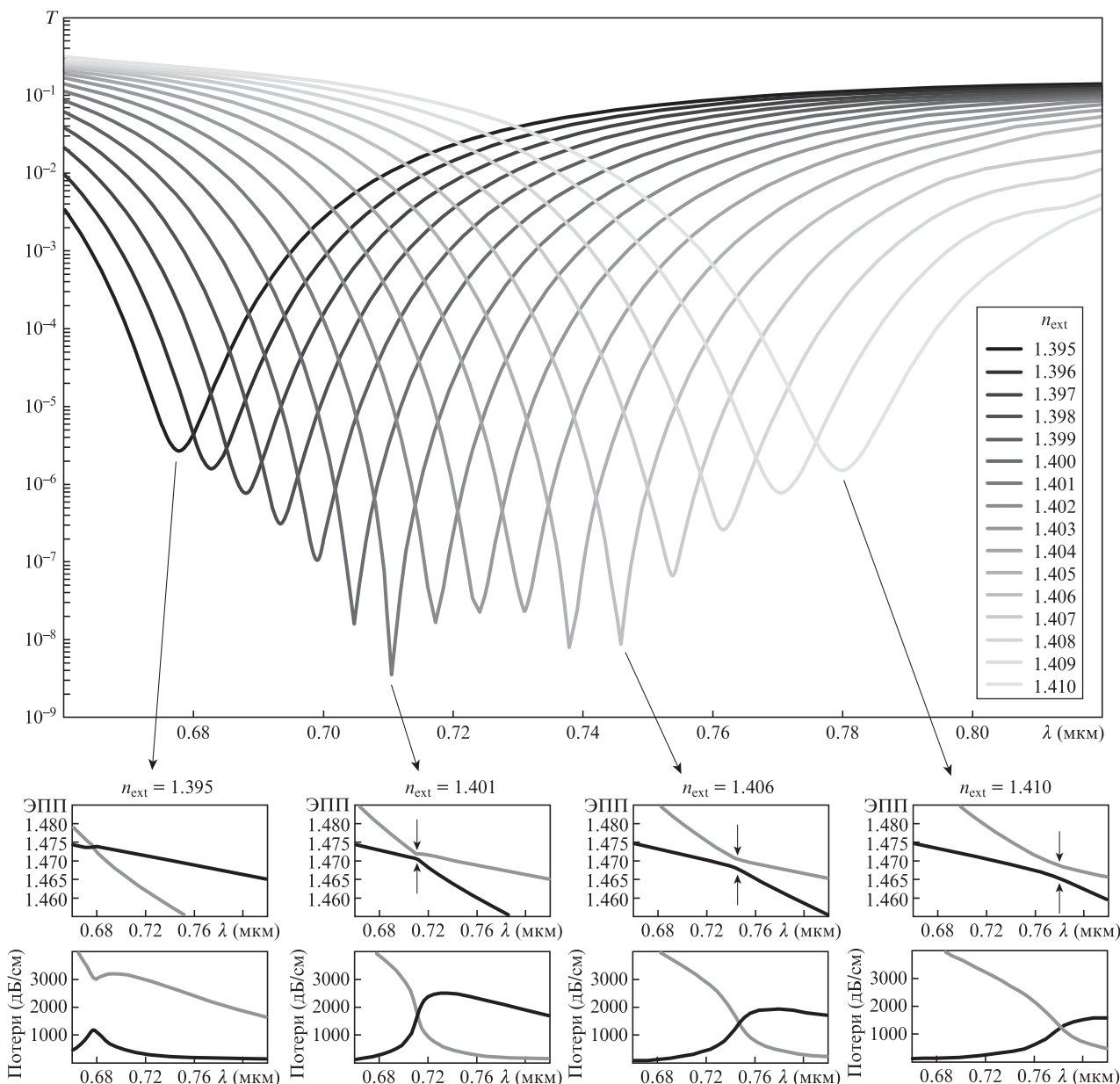


Рис.4. Результаты расчета спектров пропускания рефрактометра при $n_{ext} = 1.395-1.41$, $h_m = 68$ нм, $L = 500$ мкм. На вставках внизу приведены дисперсионные зависимости гибридных ММС при $n_{ext} = 1.395, 1.401, 1.406, 1.41$.

стью их ЭПП, которая на резонансной длине волны и вследствие незначительных потерь ВМ сводится к мнимой части ЭПП плазмонной моды n_{SP}'' . Можно показать, что при $D > n_{SP}''$ зависимости амплитуд связанных мод от координаты вдоль световода являются квазипериодическими, что соответствует режиму сильной связи, а при $D < n_{SP}''$ они приобретают квазиэкспоненциальный характер, соответствующий режиму слабой связи.

На коэффициент связи между волноводной и плазмонной модами в рассматриваемой схеме влияет в первую очередь толщина металлической пленки: с увеличением h_m профили ВМ и ППМ перекрываются меньше, что приводит к уменьшению D и, соответственно, к ослаблению связи. Если связь становится слишком слабой ($D \ll n_{SP}''$), например при $h_m = 74$ нм, передача энергии волноводной моды плазмонной волне становится малоэффективной, что значительно уменьшает глубину резонансного провала (рис.3,н). В терминах ММС это объясняется тем, что их профили и потери на резонансной длине волны различаются (см. вставки 1, 2 к рис.3), причем ММС с меньшими потерями оказывается ближе по своему профилю к моде участка 1. В результате она возбуждается более эффективно и в большей степени влияет на результирующее пропускание всей структуры, что и приводит к наблюдаемому уменьшению глубины провала.

С другой стороны, если связь слишком сильная ($D \gg n_{SP}''$), например при $h_m = 45$ нм, то спектральный диапазон, в котором она реализуется, существенно уширяется, что приводит к уширению резонансного провала (рис.3,в). Таким образом, с точки зрения получения наиболее контрастного резонансного провала оптимальной является промежуточная ситуация вблизи границы между режимами сильной и слабой связи. При $n_{ext} = 1.4$ она реализуется при толщине пленки $h_m \approx 68$ нм (рис.3,жс).

Показатель преломления внешней среды, однако, не остается постоянным в процессе рефрактометрических измерений. Его изменение приводит к смещению резонансной длины волны, которое при фиксированном значении h_m неизбежно сопровождается изменением контрастности провала. Это иллюстрируется рис.4, на котором показаны результаты расчета спектров пропускания рефрактометра, а также спектров ЭПП и потерь гибридных ММС при $h_m = 68$ нм, $n_{ext} = 1.395 - 1.41$, $L = 0.5$ мм.

Как видно из представленных на вставках к рис.4 дисперсионных зависимостей ММС, по мере увеличения резонансной длины волны с ростом n_{ext} связь между ВМ и ППМ усиливается. Это объясняется тем, что, во-первых, с увеличением длины волны профили волноводной и плазмонной мод уширяются и более эффективно перекрываются, что приводит к увеличению коэффициента связи. Во-вторых, величина n_{SP}'' , определяющая потери плазмонной моды, уменьшается с ростом λ [6], что также ведет к усилению связи.

Таким образом, при увеличении λ_{SPR} с ростом n_{ext} глубина резонансного провала сначала постепенно нарастает по мере того, как связь усиливается, но при этом все еще реализуется режим слабой связи ($n_{ext} < 1.4$). При $n_{ext} \approx 1.4$ происходит переключение на режим сильной связи и затем дальнейшее усиление связи по мере смещения λ_{SPR} с ростом n_{ext} , как это видно из увеличивающегося различия ЭПП гибридных мод на резонансной длине волны (показано стрелками на вставках к рис.4).

При $n_{ext} > 1.4$ наблюдаются также небольшие квазипериодические изменения глубины резонансного провала.

Они обусловлены периодическим обменом мощностью между волноводной и плазмонной модами, в результате которого на выходе участка 2 направляемое излучение в зависимости от периода обмена оказывается преимущественно локализованным либо в области волноводного слоя, либо вблизи металлической пленки, что влияет на величину переходных потерь на границе между участками 2 и 3. Период обмена уменьшается по мере усиления связи с ростом λ_{SPR} , что и приводит к наблюдаемым вариациям глубины провала вследствие изменения указанных переходных потерь.

При увеличении измеряемого ПП сверх $n_{ext} = 1.406$ ширина резонансного провала увеличивается из-за того, что связь ВМ – ППМ становится слишком сильной, а глубина уменьшается вследствие уменьшения потерь ППМ с ростом длины волны.

Таким образом, диапазон эффективного измерения ПП внешней среды (Δn_{ext}) можно условно определить как область значений n_{ext} , при которых глубина резонансного провала меньше максимальной не более чем на некоторое пороговое значение, например 20 дБ. В рассматриваемом случае, как видно из рис.4, это примерно соответствует диапазону $n_{ext} = 1.395 - 1.41$, т.е. $\Delta n_{ext} \approx 0.015$. Из анализа рисунка также следует, что спектральная чувствительность рефрактометра $S_{RI} \approx 6800$ нм (на единицу показателя преломления), а логарифмическая полуширина резонансного провала FWSRM в середине диапазона измерения n_{ext} составляет ~ 25 нм. Глубина проникновения плазмонной моды во внешнюю среду d_{SP} в окрестности длины волны $\lambda = 700$ нм составляет ~ 120 нм (вставка к рис.5), что дает FOM ≈ 270 и КЛР ≈ 0.44 .

Отметим, что рассмотренная конфигурация ППР-рефрактометра может использоваться для измерения иных значений показателя преломления внешней среды – как больше, так и меньше, чем 1.4. Например, при $n_{ext} \approx 1.35$ фазовый синхронизм между плазмонной и волноводной модами может быть обеспечен в окрестности длины волны $\lambda = 550$ нм (рис.5,а). В этом случае оптимальная толщина серебряной пленки составляет 58 нм. Для сохранения одноименного режима работы волноводного слоя на данной длине волны его толщину целесообразно уменьшить до 1 мкм. Поскольку потери плазмонной моды в этом спектральном диапазоне в несколько раз выше, чем при $\lambda \approx 700$ нм (см. вставку к рис.5), длина чувствительного участка уменьшена до 0.2 мм.

Несмотря на более высокие потери ППМ, ширина резонансного провала в данном случае оказывается меньше, чем в предыдущем: FWSRM ≈ 16 нм (при $n_{ext} = 1.35$), что объясняется существенно большим углом пересечения дисперсионных зависимостей волноводной и плазмонной мод (см. рис.5,а). По этой же причине, несмотря на то что физическая чувствительность плазмонной моды к ПП внешней среды растет с уменьшением длины волны [6], S_{RI} оказывается в данном случае примерно в два с половиной раза ниже, чем при $\lambda \sim 700$ нм, из-за сильного снижения инструментального вклада ($S_{RI} \approx 2600$ нм). Диапазон рефрактометрических измерений при этом увеличивается до $\Delta n_{ext} \approx 0.03$. Таким образом, FOM ≈ 162 , что более чем в полтора раза меньше, чем в предыдущем случае. Однако глубина проникновения плазмонной моды во внешнюю среду при $\lambda \sim 550$ нм составляет лишь ~ 70 нм (см. вставку к рис.5), поэтому с точки зрения измерения локальных вариаций ПП в тонком слое отличия от предыдущего случая практически нет: КЛР ≈ 0.43 .

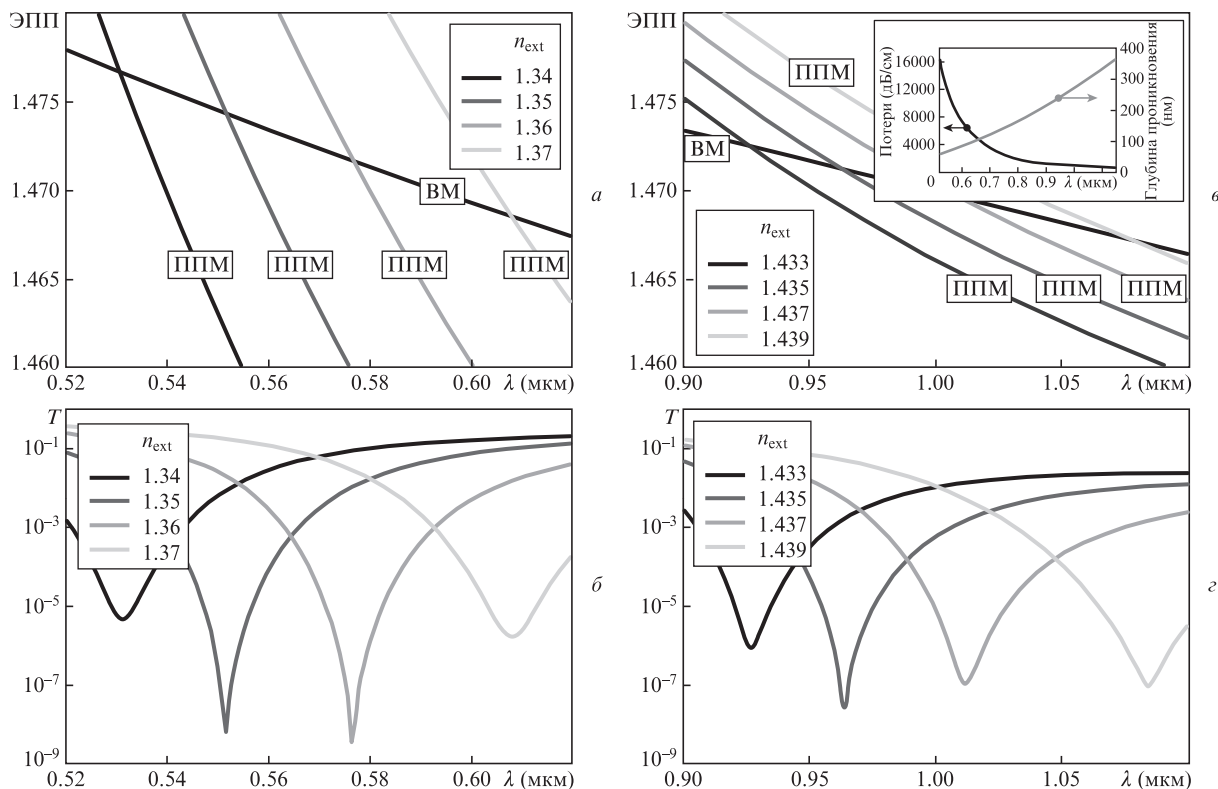


Рис.5. Спектральные зависимости ЭПП для рассматриваемых по отдельности волноводной и поверхностной плазмонной мод, а также спектры пропускания рефрактометра при $h_m = 58$ нм, $h_w = 1$ мкм, $L = 0.2$ мм, $n_{ext} = 1.34 - 1.37$ (а, б) и при $h_m = 75$ нм, $h_w = 2.5$ мкм, $L = 1.3$ мм, $n_{ext} = 1.433 - 1.439$ (в, г). На вставке показаны спектральные зависимости потерь и глубины проникновения поверхностной плазмонной моды во внешнюю среду.

При более высоком значении показателя преломления внешней среды ($n_{ext} \approx 1.435$) фазовый синхронизм между волноводной и плазмонной модами может быть обеспечен в окрестности длины волны $\lambda = 1000$ нм (рис.5,б). Оптимальная толщина пленки составляет в этом случае 75 нм, а толщина волноводного слоя – 2.5 мкм.

Особенностями данного спектрального диапазона являются, во-первых, более низкие потери ППМ, чем при $\lambda \sim 700$ нм и $\lambda \sim 550$ нм, поэтому для получения провала глубиной ~ 80 дБ необходимо увеличить длину чувствительного участка до 1.3 мм. Во-вторых, дисперсионные зависимости ВМ и ППМ пересекаются под заметно меньшим углом, чем в обоих предыдущих случаях. Это приводит к значительному повышению спектральной чувствительности из-за увеличения инструментального вклада ($S_{RI} \approx 26000$ нм), уменьшению диапазона рефрактометрических измерений ($\Delta n_{ext} \approx 0.008$), а также к уширению резонансного провала. Последняя особенность частично компенсируется более низкими потерями ППМ, что в итоге дает FWSRM ≈ 44 нм. Таким образом, по совокупности чувствительности и ширины провала в данном случае получаем заметный выигрыш: FOM ≈ 590 . Однако с точки зрения измерения локальных вариаций ПП в тонком слое отличия от двух предыдущих случаев практически нет: КЛР ≈ 0.46 за счет большой глубины проникновения поля плазмонной моды во внешнюю среду при $\lambda \sim 1000$ нм ($d_{SP} \approx 270$ нм).

3.2. ППР-рефрактометр на симметричной плазмонной моде

Введение буферного слоя между волноводом и металлической пленкой (см. рис.1,б) с показателем преломле-

ния, близким к ПП внешней среды, обеспечивает возможность построения ППР-рефрактометра на возбуждении как симметричной, так и антисимметричной плазмонных мод [6]. СПМ и АСПМ существенно отличаются по своим свойствам как друг от друга, так и от рассмотренной выше поверхностной плазмонной моды, поэтому метрологические характеристики ППР-рефрактометра с буферным слоем могут значительно отличаться от характеристик рефрактометра без буферного слоя. Чтобы получить выигрыш по измерительным параметрам, необходимо наиболее полно использовать преимущества, которые может дать та или иная плазмонная мода при создании ППР-рефрактометра.

В частности, главным преимуществом симметричной плазмонной моды являются ее низкие потери [6, 10–12]. Это позволяет получить относительно узкий резонансный провал даже при весьма малом угле пересечения дисперсионных зависимостей ВМ и СПМ, что может обеспечить чрезвычайно высокую спектральную чувствительность за счет большого инструментального вклада. Потери СПМ падают с увеличением длины волны и уменьшением толщины пленки [6], поэтому для построения ППР-рефрактометра целесообразно использовать тонкую пленку и длинноволновый спектральный диапазон. Чересчур тонкая пленка, однако, не удовлетворяет технологическим и практическим требованиям, а при слишком большой λ_{SPR} угол пересечения дисперсионных зависимостей ВМ и СПМ может стать слишком малым для получения контрастного резонансного провала, несмотря на низкие потери СПМ. Поэтому выберем в качестве компромиссного варианта $h_m = 20$ нм и рабочую длину волны в окрестности $\lambda = 1000$ нм.

Отметим также, что симметричная плазмонная мода имеет значительно меньший эффективный показатель прелом-

ломления, чем ППМ и АСПМ, поэтому для ее фазового согласования с волноводной модой необходимо использовать материалы с низкой оптической плотностью. Указанным требованиям удовлетворяет, например, следующая структура: подложка – полимер Сутор ($n_s \sim 1.34$ [18]), волноводный слой – MgF_2 ($n_w \sim 1.37$ [19], $h_w = 200$ нм), буферный слой – Сутор ($n_b \sim 1.34$), пленка серебра ($h_m = 20$ нм).

На рис.6,*a* представлены результаты расчета дисперсионных зависимостей рассматриваемых по отдельности ВМ и СПМ при $n_{\text{ext}} = 1.33$. Видно, что условие фазового синхронизма между ними при данном значении ПП внешней среды выполняется вблизи $\lambda = 1040$ нм. Для обеспечения наиболее контрастного провала в спектре пропускания рефрактометра требуется, чтобы в окрестности этой длины волны происходило также переключение режима связи между ВМ и СПМ. В данной конфигурации, в отличие от ППР-рефрактометра без буферного слоя, на режим связи между ВМ и СПМ влияет, в первую очередь, толщина буферного слоя h_b . Расчеты показывают, что оптимальная величина h_b , при которой переключение режима связи происходит при $n_{\text{ext}} \sim 1.33$ в окрестности $\lambda = 1040$ нм, составляет 13.3 мкм (рис.6,*b, в, д* и *е*).

Результаты расчета спектров пропускания рефрактометра при $n_{\text{ext}} = 1.3299-1.3302$, $h_b = 13.3$ мкм приведены на рис.6,*з*. Спектральная чувствительность S_{R1} в данном случае составляет ~ 120000 нм, диапазон измерений $\Delta n_{\text{ext}} \approx 0.0004$, полуширина резонансного провала FWSRM ≈ 18 нм (при $n_{\text{ext}} \sim 1.3301$), т. е. FOM ≈ 6670 , что более чем на порядок превышает аналогичный показатель для ППР-рефрактометра без буферного слоя. Несмотря на то что глубина проникновения СПМ во внешнюю среду значительно больше, чем для поверхностной плазмонной моды, и составляет ~ 580 нм при $\lambda \sim 1050$ нм, с точки зрения ло-

кального разрешения также получаем заметный выигрыш: КЛР ≈ 0.09 , что примерно в пять раз ниже, чем КЛР рефрактометра без буферного слоя. Отметим, что полученный выигрыш в метрологических характеристиках обеспечивается за счет низких потерь СПМ (~ 30 дБ/см при $\lambda \sim 1050$ нм). Поэтому он неизбежно сопряжен с увеличением длины чувствительного участка (глубина резонансного провала ~ 80 дБ обеспечивается в данном случае при $L = 6$ см).

При необходимости длину чувствительного элемента можно уменьшить, подбирая параметры структуры так, чтобы условие плазмонного резонанса выполнялось в более коротковолновом спектральном диапазоне, где СПМ имеет более высокие потери. Например, при толщине волноводного слоя $h_w = 400$ нм плазмонный резонанс возникает при $n_{\text{ext}} \sim 1.33$ в окрестности длины волны $\lambda = 600$ нм. Оптимальная толщина буферного слоя при этом составляет 2.6 мкм. Потери симметричной плазмонной моды на данной длине волны оказываются примерно на порядок выше, чем при $\lambda \sim 1000$ нм, и составляют 310 дБ/см, что позволяет уменьшить длину чувствительного участка в 10 раз: $L = 6$ мм. Спектральная чувствительность оказывается при этом также почти на порядок меньше из-за сильного уменьшения инструментального вклада ($S_{R1} \approx 16000$ нм), что сопровождается увеличением диапазона измерений ($\Delta n_{\text{ext}} \approx 0.003$), а также некоторым сужением резонансного провала (FWSRM ≈ 12 нм). Таким образом, по совокупности чувствительности и ширины провала данная конфигурация рефрактометра на СПМ более чем в пять раз уступает предыдущей (FOM ≈ 1330). Однако вследствие меньшей глубины проникновения СПМ во внешнюю среду при $\lambda \sim 600$ нм ($d_{SP} \approx 200$ нм) локальное разрешение рефрактометра ухудшается незначительно: КЛР ≈ 0.15 .

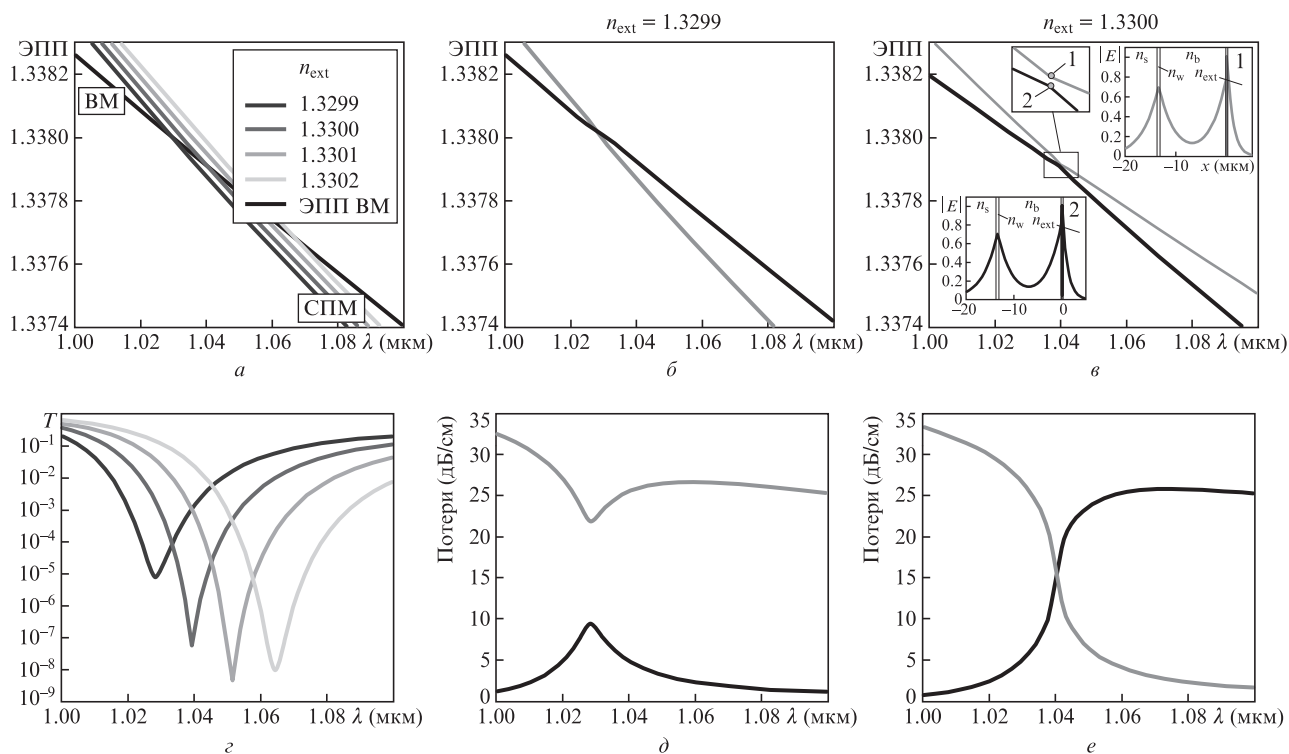


Рис.6. Дисперсионные зависимости рассматриваемых по отдельности волноводной и симметричной плазмонной мод (*a*), а также спектры пропускания рефрактометра (*з*) при $n_{\text{ext}} = 1.3299-1.3302$; спектральные зависимости ЭПП и потерь гибридных ММС металлизированного участка при $n_{\text{ext}} = 1.3299$ (*б, д*) и 1.33 (*в, е*) ($L = 60$ мм, $h_w = 200$ нм, $h_b = 13.3$ мкм, $h_m = 20$ нм). На вставках к рис.6,*в* показаны профили гибридных ММС на резонансной длине волны при $n_{\text{ext}} = 1.33$.

3.3. ППР-рефрактометр на антисимметричной плазмонной моде

Из анализа свойств антисимметричной плазмонной моды [6, 13, 14] можно заключить, что с точки зрения построения ППР-рефрактометра преимуществом АСПМ является, во-первых, более высокая степень локализации поля, что потенциально обеспечивает более высокую локальную чувствительность к изменению показателя преломления n_{ext} в тонком слое. Во-вторых, она обладает более высокой физической чувствительностью к изменению показателя преломления n_{ext} по сравнению с СПМ. В-третьих, высокие потери АСПМ позволяют добиться глубокого резонансного провала при минимальной длине чувствительного элемента. Все эти особенности становятся более выраженными с уменьшением толщины металлической пленки и длины волны [6]. Кроме того, как показывают расчеты, при различных показателях преломления сред, находящихся с разных сторон от пленки, профиль АСПМ смещен в сторону оптически более плотной среды, что приводит к дополнительному увеличению физической чувствительности к ПП этой среды.

Таким образом, для наиболее полной реализации преимуществ АСПМ при построении ППР-рефрактометра целесообразно, во-первых, использовать коротковолновый спектральный диапазон, во-вторых – достаточно тонкую металлическую пленку, а в-третьих, выбрать ПП буферного слоя меньше, чем ПП внешней среды. Кроме того, учитывая весьма высокий ЭПП антисимметричной плазмонной моды [6], для ее фазового согласования с ВМ материал волноводного слоя должен обладать достаточно высокой оптической плотностью. Указанным требованиям отвечает, например, следующая структура: подложка –

SiO_2 , волноводный слой – Si_3N_4 ($n_w \sim 2$ [20], $h_w = 250$ нм), буферный слой – Teflon AF2400 ($n_b \sim 1.28$ [21]), пленка серебра ($h_m = 20$ нм), внешняя среда ($n_{\text{ext}} > n_b$).

На рис. 7, а приведены дисперсионные зависимости рассматриваемых по отдельности волноводной и антисимметричной плазмонной мод при различных значениях n_{ext} в диапазоне 1.34–1.37. Как видно из рисунка, фазовый синхронизм между ними при выбранных параметрах волноводной структуры может быть обеспечен при $\lambda \sim 640$ нм, где, как показывают расчеты, потери АСПМ составляют ~ 42000 дБ/см. Оптимальная толщина буферного слоя h_b , при которой вблизи этой длины волны происходит переключение режима связи между ВМ и АСПМ, составляет 180 нм (рис. 7, б, в, д, е). Потери гибридных ММС на резонансной длине волны в этом случае достигают ~ 22000 дБ/см, что позволяет уменьшить длину чувствительного участка до 40 мкм.

Результаты расчета спектров пропускания рефрактометра при $n_{\text{ext}} = 1.34$ –1.37 приведены на рис. 7, з. Как следует из рисунка, спектральная чувствительность рефрактометра $S_{\text{RI}} \approx 900$ нм, диапазон измерения $\Delta n_{\text{ext}} \approx 0.03$, полуширина провала ~ 35 нм (при $n_{\text{ext}} = 1.36$), что дает $\text{FOM} \approx 25.7$ (это примерно на порядок ниже, чем в случае ППР-рефрактометра без буферного слоя, и в 260 раз ниже, чем для ППР-рефрактометра на СПМ). Глубина проникновения АСПМ во внешнюю среду в окрестности длины волны $\lambda = 640$ нм составляет лишь 44 нм, и, следовательно, $\text{КЛР} \approx 1.7$.

Отметим, что столь низкая спектральная чувствительность обусловлена малостью инструментального вклада вследствие большого угла пересечения дисперсионных зависимостей ВМ и АСПМ. Подбирая параметры структуры так, чтобы плазмонный резонанс возникал в более длин-

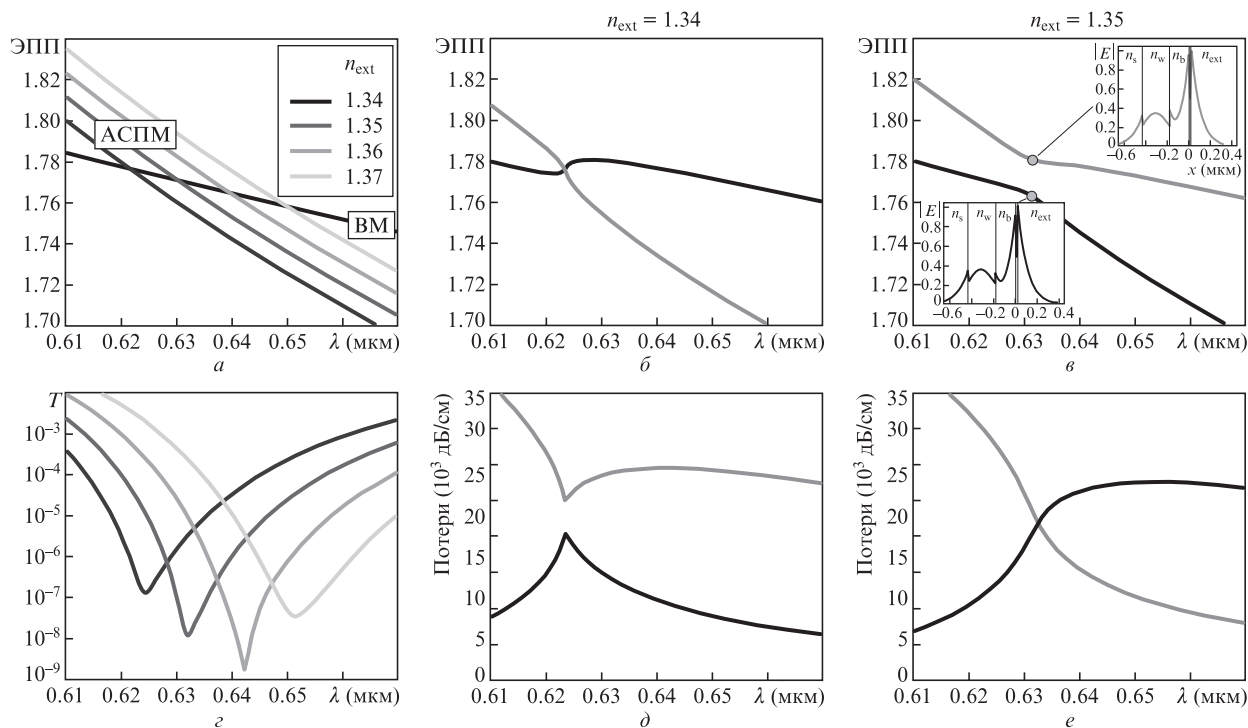


Рис. 7. Дисперсионные зависимости рассматриваемых по отдельности волноводной и антисимметричной плазмонной мод (а), а также спектры пропускания рефрактометра (з) при $n_{\text{ext}} = 1.34$ –1.37; спектральные зависимости ЭПП и потерь гибридных ММС металлизированного участка при $n_{\text{ext}} = 1.37$ (б, д) и 1.35 (в, е) ($L = 0.04$ мм, $h_w = 250$ нм, $h_b = 180$ нм, $h_m = 20$ нм). На вставках к рис. 7, в показаны профили гибридных ММС на резонансной длине волны при $n_{\text{ext}} = 1.35$.

новолновом спектральном диапазоне, можно добиться меньшего угла пересечения дисперсионных зависимостей и, следовательно, более высокой спектральной чувствительности. Ширина провала при этом также увеличивается, но из-за уменьшения потерь АСПМ с ростом длины волны можно получить некоторый выигрыш по совокупности спектральной чувствительности и ширины провала, что, однако, достигается в ущерб компактности измерительного преобразователя.

Например, при толщине волноводного слоя 150 нм условие плазмонного резонанса выполняется при $n_{\text{ext}} \sim 1.33$ в окрестности длины волны $\lambda = 900$ нм, где потери АСПМ составляют ~ 11000 дБ/см. При оптимальной толщине буферного слоя ($h_b = 568$ нм) резонансный провал глубиной ~ 80 дБ достигается при длине чувствительного участка $L = 180$ мкм. Спектральная чувствительность в этом случае составляет 3700 нм, диапазон измерений $\Delta n_{\text{ext}} \approx 0.02$, полуширина провала FWSRM ≈ 65 нм, глубина проникновения плазмонной волны во внешнюю среду $d_{\text{SP}} \approx 117$ нм, что дает FOM ≈ 57 и КЛР ≈ 2.05 .

4. Обсуждение результатов

Метрологические характеристики всех трех исследованных конфигураций ППР-рефрактометра сведены в табл.1.

Видно, что основной причиной различий в метрологических характеристиках исследованных рефрактометров является различная спектральная чувствительность. Физическая чувствительность при этом изменяется несущественно, и наблюдаемые отличия обусловлены главным образом разными инструментальными вкладами.

Наилучшими метрологическими характеристиками обладает ППР-рефрактометр на СПМ: вследствие малости потерь контрастный резонансный провал может быть получен при очень малом угле пересечения дисперсионных зависимостей ВМ и СПМ, что обеспечивает чрезвычайно высокую инструментальную чувствительность. Выигрыш по совокупности спектральной чувствительности и ширины провала (по параметру FOM) достигает примерно двух

порядков величины по сравнению с ППР-рефрактометром на АСПМ и одного порядка – по сравнению с ППР-рефрактометром без буферного слоя.

Помимо низких потерь, СПМ характеризуется также большей, чем у АСПМ и ППМ, глубиной проникновения во внешнюю среду. Поэтому с точки зрения измерения локальных вариаций ПП в тонком слое преимущество использования СПМ менее выражено – выигрыш по коэффициенту локального разрешения составляет ~ 20 по отношению к ППР-рефрактометру на АСПМ и ~ 5 по отношению к ППР-рефрактометру без буферного слоя.

Следует подчеркнуть, что метрологическое преимущество ППР-рефрактометра на СПМ достигается в ущерб компактности измерительного преобразователя: для получения столь же глубокого резонансного провала, что и в случае рефрактометров на ППМ и АСПМ, требуется значительно большая (до трех порядков) длина чувствительного участка.

Минимальная длина чувствительного участка и, соответственно, максимальная компактность измерительного преобразователя достигаются в ППР-рефрактометре на АСПМ, который, однако, обладает наихудшими метрологическими характеристиками вследствие чрезвычайно высоких потерь АСПМ.

ППР-рефрактометр без буферного слоя занимает промежуточное положение между рефрактометрами на СПМ и АСПМ как по метрологическим характеристикам, так и по длине чувствительного участка. Однако он выгодно отличается от них простотой оптической схемы и, соответственно, простотой в изготовлении, что является важным преимуществом с практической точки зрения.

Из табл.1 видно, что величина измеряемого показателя преломления зависит от параметров металлизированного участка и от рабочего спектрального диапазона. Выбирая более длинноволновый диапазон, где плазмонная мода имеет меньшие потери, и соответственно увеличивая длину металлизированного участка, можно получить выигрыш по совокупности чувствительности и ширины провала. Однако коэффициент локального разрешения при этом изменяется незначительно, поскольку

Табл.1.

Параметр	ППР-рефрактометр							
	Без буферного слоя			С буферным слоем на СПМ		С буферным слоем на АСПМ		
Измеряемый ПП	1.355 ± 0.015	1.404 ± 0.0075	1.437 ± 0.004	1.33 ± 0.0015	1.3301 ± 0.0002	1.355 ± 0.015	1.33 ± 0.01	
Рабочий спектральный диапазон (нм)	530–610	680–780	920–1120	600–650	1030–1080	625–655	900–980	
Инструментальная чувствительность, S_1	2000	6000	24000	34000	316000	825	4350	
Физическая чувствительность, S_2	1.26	1.14	1.08	0.47	0.38	1.09	0.85	
Спектральная чувствительность $S_{R1} = S_1 S_2$ (нм)	2600	6800	26000	16000	120000	900	3700	
Полуширина провала FWSRM (нм)	16	25	44	12	18	35	65	
FOM	162	270	590	1330	6670	25.7	57	
Потери плазмонной моды вблизи λ_{SPR} (дБ/см)	11620	3650	970	310	30	42000	11000	
Длина L при глубине провала ~ 80 дБ (мм)	0.2	0.5	1.3	6	60	0.04	0.18	
Глубина проникновения d_{SP} (нм)	70	120	270	200	580	44	117	
КЛР	0.43	0.44	0.46	0.15	0.09	1.7	2.05	

увеличение FOM компенсируется ростом глубины проникновения плазмонной моды во внешнюю среду. Отметим также, что при чрезмерном смещении резонансной длины волны в инфракрасную область ($\lambda_{\text{SPR}} > 1200$ нм) угол пересечения дисперсионных зависимостей волноводной и плазмонной мод может быть столь мал, а ширина провала столь велика, что рефрактометрические измерения становятся неэффективными, несмотря на очень высокую чувствительность.

В заключение отметим, что приведенные в табл.1 значения измеряемого показателя преломления внешней среды и соответствующие резонансные длины волн определяются конкретным выбором материалов и параметров металлизированного участка и, следовательно, могут варьироваться. Однако выявленные тенденции и закономерности при этом сохраняются.

5. Заключение

Таким образом, в работе исследованы три конфигурации ППР-рефрактометра: без буферного слоя на основе возбуждения поверхностной плазмонной моды, а также с буферным слоем на основе возбуждения симметричной и антисимметричной плазмонных мод.

Показано, что для обеспечения наиболее высоких метрологических характеристик рефрактометра целесообразно использовать СПМ, однако это сопряжено со значительным увеличением длины чувствительного элемента.

В случае, когда основным требованием к рефрактометру является минимальный размер, оптимальным вариантом является использование АСПМ, что позволяет минимизировать длину чувствительного участка ценой некоторого ухудшения метрологических характеристик.

Наконец, с точки зрения простоты изготовления наиболее привлекательной является схема ППР-рефрактомет-

ра без буферного слоя, который занимает промежуточное положение между рефрактометрами на АСПМ и СПМ как по метрологическим характеристиками, так и по длине чувствительного участка.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-12-10165).

1. Rasooly A., Herold K.E. (Eds). *Biosensors and Biodection* (Totowa, NJ: Humana Press, 2009).
2. Guo X. *J. Biophoton.*, **5**, 483 (2012).
3. Baldini F. et al. *Optical Chemical Sensors* (Erice, Italy: Springer Science & Business Media, 2006, vol. 224).
4. Ligler F.S., Taitt C.R. (Eds). *Optical Biosensors: Today and Tomorrow* (Oxford: Elsevier, 2011).
5. Homola J. *Chem. Rev.*, **108** (2), 462 (2008).
6. Homola J. *Surface Plasmon Resonance Based Sensors, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2006).
7. <https://www.hindawi.com/journals/js/2009/979761/cta/>
8. Caucheteur C., Guo T., Albert J. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **407** (14), 3883 (2015).
9. Klantsataya E. et al. *J. Sensors*, **17** (1), 12 (2016).
10. Nenninger, G.G. et al. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **74** (1–3) 145 (2001).
11. Slavík R., Homola J. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **123** (1), 10 (2007).
12. Jakub D., Kasry A., Knoll W. *Plasmonics*, **2** (3), 97 (2007).
13. Fan B., Liu F., Li Y., Huang Y., Miura Y., Ohnishi D. *Appl. Phys. Lett.*, **100** (11), 111108 (2012).
14. Fan Boyu et al. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **186**, 495 (2013).
15. Palik E.D. *Handbook of Optical Constants of Solids* (San Diego: Acad. Press, 1998).
16. Snyder A.W., Love J. *Optical Waveguide Theory* (Erice, Italy: Springer Science & Business Media, 2012).
17. Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. *Acta Phys. Polonica-Ser. A General Phys.*, **116** (4), 585 (2009).
18. <http://www.bellexinternational.com/products/cytop/pdf/cytop-catalog.pdf>
19. Li H.H. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **9** (1), 161 (1980).
20. Philipp H.R. *J. Electrochem. Soc.*, **120** (2), 295 (1973).
21. Yang Min K., French R.H., Tokarsky E.W. *J. Micro/Nanolithography. MEMS and MOEMS*, **7** (3), 033010 (2008).