

УДК 53.082.539

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОГЛАСОВАННОЙ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА НАРУШЕНИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ*

В. С. Терентьев, В. А. Симонов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: terentyev@iae.nsk.su*

Представлен экспериментальный метод изготовления сенсора и оптимизации его характеристик на основе металл-диэлектрической структуры (Al + ZnS). Исследован коэффициент отражения света (p -поляризация) от слоя алюминия в зависимости от его толщины при разных углах падения на длине волны 532 нм. На основании расчётов, которые качественно совпадают с экспериментальными результатами, изготовлена структура, состоящая из согласованных слоёв алюминия и сульфида цинка и имеющая повышенное угловое разрешение по сравнению с алюминиевой плёнкой без диэлектрического покрытия. Оценочный предел детектирования сенсора на основе данной структуры при угловых измерениях составил $2,6 \cdot 10^{-5}$ RIU (единица коэффициента преломления).

Ключевые слова: нарушение полного внутреннего отражения, тонкая металлическая плёнка, металл-диэлектрическая интерференционная структура, сенсорика коэффициента преломления.

Введение. Исследования свойств сенсоров на основе эффекта нарушения полного внутреннего отражения (НПВО) интенсивно ведутся в последнее время [1]. Известны сенсорные схемы, в которых используются тонкие металлические слои, дифракционные решётки или нанокompозитные материалы, представляющие собой вариант дифракционных структур с субволновым периодом. Характеристики данных слоёв подбираются так, чтобы сенсор имел максимальные разрешающую способность и чувствительность к изменению коэффициента преломления среды-аналита, в качестве которой используются золото и серебро, обладающие наилучшими параметрами среди металлов [2]. В данной работе проводится исследование сенсора на основе эффекта НПВО в схеме Кречмана (рис. 1). В ней применяются прямоугольная призма и подложка с металл-диэлектрическим покрытием. Подложка может иметь отличный от призмы коэффициент преломления $n_{\text{п}} \neq n_{\text{пр}}$. Принцип работы сенсора заключается в фиксировании изменения спектральных, амплитудных или угловых зависимостей коэффициента отражения R в соответствии с изменением коэффициента преломления аналита $n_{\text{а}}$. Наличие в структуре сенсора металлического слоя, вносящего потери для бегущей световой волны, т. е. слоя с эффективным комплексным коэффициентом преломления $n_{\text{МП}} = n - ik$, приводит к резонансным угловой и спектральной зависимостям R , которые могут иметь глубокий и крутой провал или острый пик. Если этот провал доходит до нуля, то реализуются наилучшие условия для обеспечения максимального соотношения сигнал/шум в измерительной системе.

Для оптимизации свойств сенсора используется дополнительный диэлектрический слой [3, 4], за счёт которого можно увеличить разрешающую способность сенсора. Кроме

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00248 а).

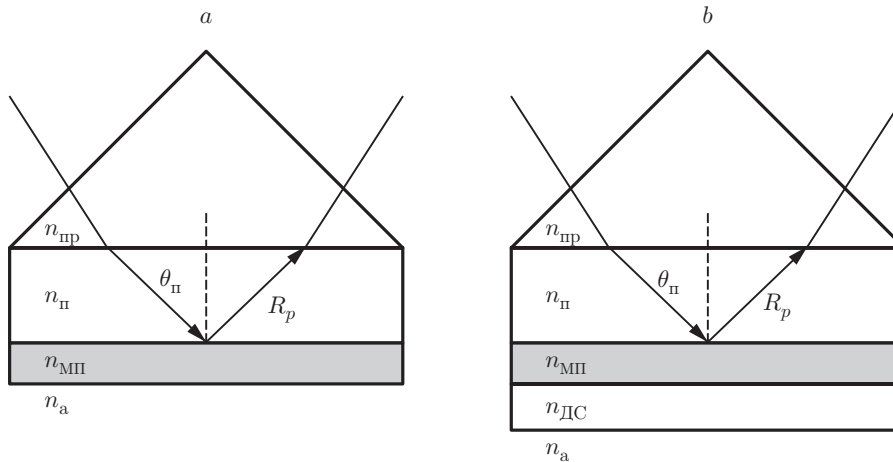


Рис. 1. Схема Кречмана: *a* — с металлической плёнкой (МП), *b* — с дополнительным диэлектрическим слоем (ДС). Коэффициенты преломления: $n_{\text{пр}}$ — прямоугольной призмы, $n_{\text{п}}$ — подложки на оптическом контакте с призмой, $n_{\text{МП}}$ — металлической плёнки, $n_{\text{ДС}}$ — диэлектрического слоя, $n_{\text{а}}$ — среды-аналита; R_p — коэффициент отражения *p*-поляризованного света

того, в случае химически нестойких металлов, например алюминия, диэлектрический слой выполняет функцию химической защиты.

Другими словами, рис. 1, *b* представляет один из вариантов отражательного многолучевого интерферометра [5], передним зеркалом в котором является металлическая плёнка, а задним — полностью отражающая граница диэлектрической плёнки с анализитом. При изменении коэффициента преломления анализита меняется фаза отражения заднего зеркала, что приводит к новому виду характеристики коэффициента отражения.

Цель данной работы — создание экспериментального метода оптимизации параметров сенсора на основе алюминиевой плёнки и диэлектрического слоя сульфида цинка.

Численное моделирование. Коэффициент отражения $R = R(\lambda, \theta, D_{ML}, N_{ML})$ как функция включает в себя несколько независимых величин, которые значительно влияют на характеристики сенсора. Здесь $N_{ML} = (n_0(\lambda), n_1(\lambda), \dots, n_N(\lambda))$ — набор коэффициентов преломления, зависящих от длины волны, в котором могут содержаться комплексные величины; $D_{ML} = (d_1, d_2, \dots, d_{N-1})$ — набор толщин слоёв; $n_0 = n_{\text{п}}$; $n_N = n_{\text{а}}$; $n_{\text{пр}}$ влияет на угол падения света в подложке. В общем случае аналитическое рассмотрение затруднено, поэтому для исследования обычно используется численное моделирование в рамках теории распространения плоских волн в слоистой среде в модели сплошного слоя (МСС) [6]. Данная модель применяется в том числе и для тонких металлических плёнок, для которых коэффициенты преломления берутся такими же, как и для массивных металлов.

Целью численного моделирования было определение условий получения согласованной плёнки алюминия на гипотенузной грани призмы. Для согласованной плёнки при некоторых толщине, поляризации, угле падения света $\theta_{\text{п}} > \theta_{\text{ПВО}}$ и длине волны получается экстремум, который может достигнуть нуля: $R \rightarrow 0$ ($\theta_{\text{ПВО}} = \arcsin(n_{\text{п}}/n_{\text{а}})$ — угол полного внутреннего отражения).

В схеме Кречмана измерения можно проводить несколькими способами. Первый заключается в наблюдении за спектром отражения при неизменном угле падения $R(\lambda_0, \theta_{\text{п}} = \text{const})$. Второй — в зависимости от угла $\theta_{\text{п}}$ при заданной длине волны $R(\lambda_0 = \text{const}, \theta_{\text{п}})$. Третий — амплитудный, в котором изменяется амплитуда отражения при фиксированных угле и длине волны $R(\lambda_0 = \text{const}, \theta_{\text{п}} = \text{const})$. Четвёртый, самый чувствительный,

однако одновременно и самый технически сложный метод — измерение фазы отражения R в двухлучевой интерференционной схеме, например интерферометре Маха — Цандера [7]. В данной работе используется второй способ.

Для описания оптических характеристик слоистой структуры (см. рис. 1) необходимо знать коэффициенты преломления всех сред. Хотя показатели преломления массивных металлов известны, при малой толщине может проявляться аномальность свойств плёнки. Обычно в сенсорах, основанных на эффекте НПВО, применяются металлические плёнки толщиной много меньше длины волны (около 50 нм), а их показатели преломления сильно зависят от многих факторов и в общем случае неизвестны. В определении свойств тонких плёнок и заключается главная трудность [1]. Для качественного описания свойств многослойной системы можно использовать данные для объёмных металлов. Результаты моделирования могут быть применены при разработке экспериментального метода изготовления сенсора и оптимизации его параметров.

Известно, что свойства s - и p -поляризаций коэффициентов отражения различны и наиболее чувствительной является p -поляризация, которую рассмотрим далее. Моделируется структура (рис. 1, a) со следующими параметрами: $\lambda = 532$ нм, $n_0 = 1,46$ ($n_p = 1,52$), $n_{МП} = 0,90175 - i6,2097$ [8], $n_a = 1$. Угол падения света θ_{Π} на плёнку значительно влияет на форму зависимостей $R_p(d_{МП})$, особенно при приближении к углу $\theta_{ПВО} = 43,23^\circ$. Для различных металлов изменение формы зависимостей $R_p(d_{МП})$ от угла падения света исследовалось в [9] с точки зрения оптимальности их применения для сенсоров. Рис. 2, a показывает, как изменяется положение минимума $R_p(d_{МП})$ при изменении угла падения света θ_{Π} . Минимум смещается в сторону меньших толщин при повышении θ_{Π} . Существует некоторая комбинация угла и толщины $d_{МП}$, при которой можно получить близкий к нулю коэффициент отражения (см. рис. 2, a , зависимость $44,7^\circ$), что обеспечивает максимальный контраст характеристики, а плёнку с такой толщиной будем называть согласованной.

Используемая при моделировании толщина плёнки $d_{МП}$ может не соответствовать толщине реальной плёнки, так как при очень малой толщине она имеет отличную от массивного металла структуру. Для описания свойств тонких плёнок (<20 нм) существует метод проводящей поверхности (МПП) [10, 11], с помощью которого можно с хорошей степенью точности описывать характеристики реальных плёнок и сильно упростить аналитические формулы.

Исследование угловых зависимостей $R_p(\theta_{\Pi})$ для заданных толщин $d_{МП}$ (рис. 2, b) показывает, что при отклонении от согласованной толщины плёнки форма зависимостей также изменяется. Для более тонких плёнок угловая ширина провала увеличивается, для более толстых — уменьшается.

Для повышения угловой чувствительности на металлический слой можно нанести диэлектрический [4], что приводит к сужению резонансов. Рассмотрим нанесение слоя ZnS на плёнку (см. рис. 2, b , $d_{МП} = 11,5$ нм), которая имеет максимальный контраст. При увеличении толщины диэлектрического слоя угловая зависимость трансформируется (рис. 2, c). При стремлении толщины слоя ZnS к $\lambda/(2n_{ZnS}) = 111,3$ нм ($n_{ZnS} = 2,39$) у угловой зависимости увеличиваются ширины пиков и провалов (зависимости 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). При достижении оптической толщины около половины длины волны трансформация зависимости приводит к образованию более острого пика в районе угла ПВО с угловой шириной меньше начальной. Степень остроты пика пропорциональна угловой ширине $\Delta\theta$, определяемой как расстояние между первыми минимумами угловой зависимости ($\theta_{1,2}$) для углов меньше и больше $\theta_{ПВО}$ (см. рис. 2, c). Угловая ширина $\Delta\theta$ зависит от толщины слоя диэлектрика и достигает $0,63^\circ$ для $d_{ZnS} = \lambda/(2n_{ZnS})$, и при дальнейшем её увеличении повторяется трансформация (1 \rightarrow 3). Рис. 3, a демонстрирует, что острота пика может быть и выше, если нанести слой диэлектрика меньшей толщины, однако при этом будет ухуд-

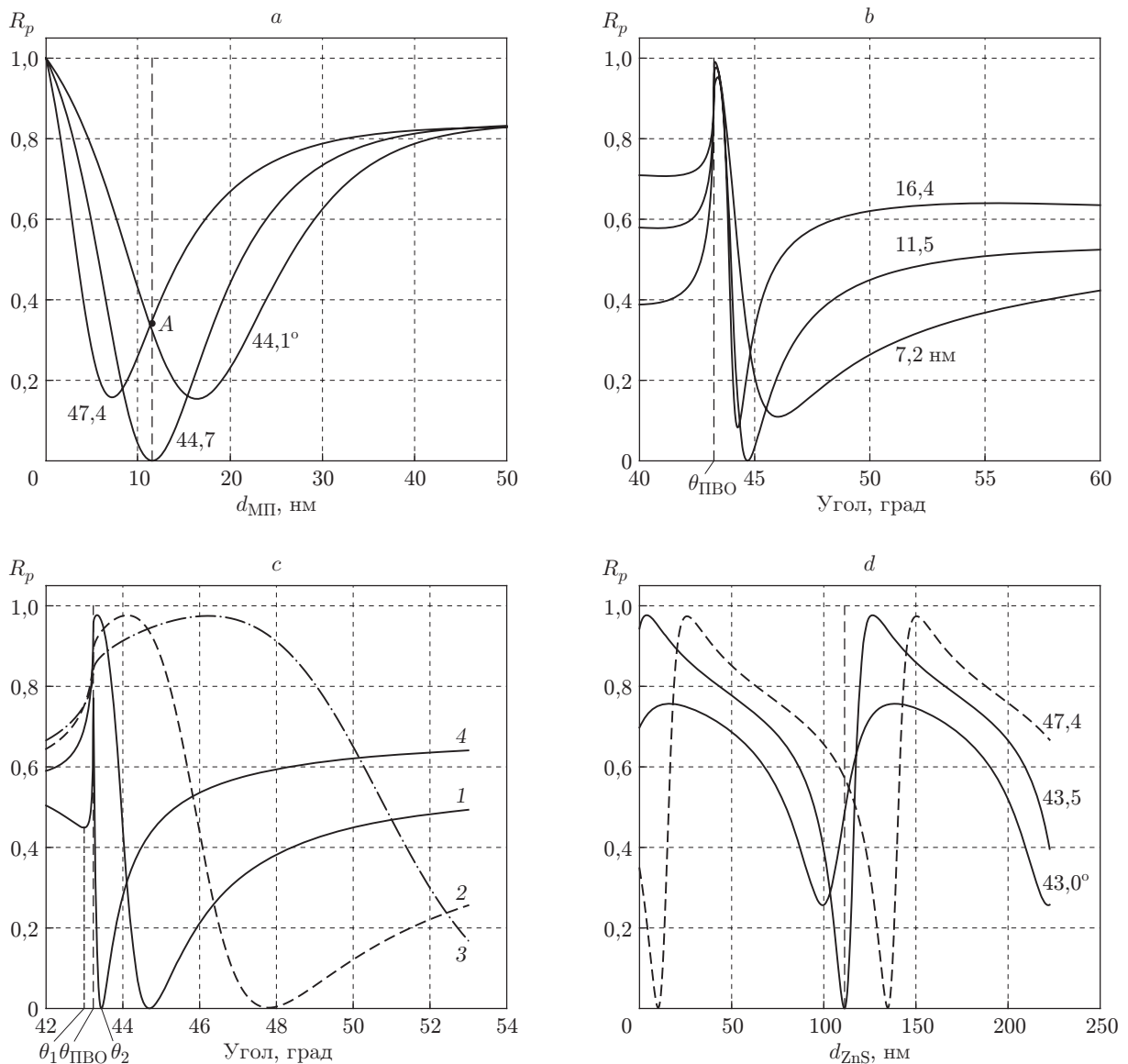


Рис. 2. Зависимости R_p в схеме Кречмана: *a* — от толщины металлической плёнки $d_{МП}$ для углов падения $\theta_{п}$; *b* — от угла падения света для разных толщин металлической плёнки $d_{МП}$; *c* — от угла $\theta_{п}$ для плёнки $d_{МП} = 11,5$ нм и разных толщин слоя сульфида цинка d_{ZnS} (кривая 1 — 0 нм, 2 — $0,1\lambda/(2n_{ZnS})$, 3 — $0,3\lambda/(2n_{ZnS})$, 4 — $\lambda/(2n_{ZnS})$, $\theta_{1,2}$ — минимумы); *d* — от толщины слоя ZnS для разных углов падения света $\theta_{п}$ при $d_{МП} = 11,5$ нм

паться контраст C , равный отношению максимального коэффициента отражения R_{max} в интервале углов $\Delta\theta$ к большему значению среди минимумов: $C = R_{max} / \max(R(\theta_1), R(\theta_2))$. Величина $C = 1$ означает, что форма зависимости не имеет пика в районе угла ПВО. Нанесение более толстых слоёв диэлектрика для угловых измерений нецелесообразно, так как увеличивает геометрический снос пучка в плёнке.

В эксперименте могут возникнуть трудности с нанесением слоя диэлектрика заданной толщины, чему способствуют особые условия нанесения, такие как скорость, буферная и остаточная атмосфера в вакуумной камере. Оптический интерференционный контроль может позволить осуществить нанесение без дополнительных затруднений. Рис. 2, *d* показывает, что если контролировать нанесение под углом, бóльшим угла ПВО (зависимость

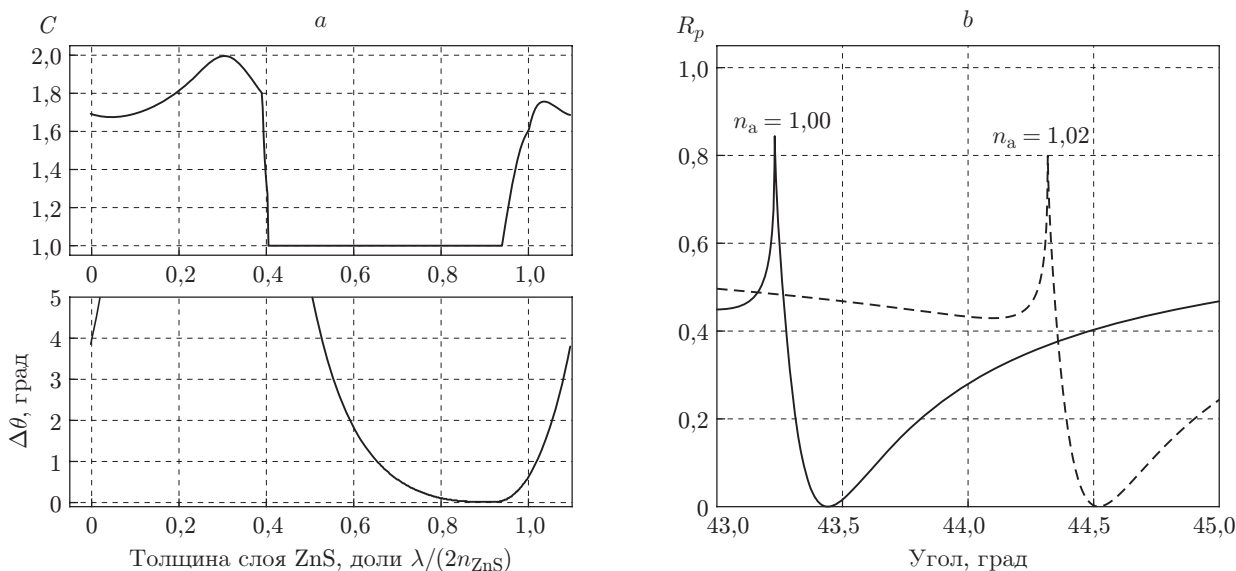


Рис. 3. Характеристики сенсора НПВО: *a* — контраст C угловой зависимости вблизи угла ПВО и расстояние между минимумами $\Delta\theta$ в зависимости от толщины слоя ZnS; *b* — угловые зависимости R_p для структуры с алюминиевой плёнкой $d_{МП} = 11,5$ нм и слоя ZnS толщиной $\lambda/(2n_{ZnS})$ для разных n_a

$47,4^\circ$), то ориентиры-минимумы будут располагаться дальше от нужной оптической толщины $\lambda/(2n_{ZnS})$ (вертикальная штриховая линия). Если же контроль вести в окрестности угла ПВО (зависимость $43,5^\circ$), то минимум зависимости расположен близко к $\lambda/(2n_{ZnS})$. Если угол контроля меньше угла ПВО, то контраст зависимости ухудшается (зависимость 43°).

Принцип работы сенсора углового типа основан на измерении положения провала R_p [4] либо пика вблизи $\theta_{ПВО}$ [1] в зависимости от коэффициента преломления аналита n_a . Смещение угловой характеристики при изменении коэффициента преломления n_a среды-аналита на 0,02 единицы коэффициента преломления (RIU) можно проследить на рис. 3, *b*. Вычисления выполнены для $d_{ZnS} = \lambda/(2n_{ZnS})$ (см. рис. 2, *c*). Смещение пика угловой характеристики происходит на величину $\sim 1,1^\circ$. Таким образом, в этой конфигурации чувствительность к изменению коэффициента преломления аналита составляет $54^\circ/\text{RIU}$. Общая формула для угловой чувствительности $S_{n_a} = d\theta_{ПВО}/dn_a$ сенсора данного типа около угла ПВО имеет вид

$$S_{n_a} = \frac{d\theta_{ПВО}}{dn_a} = \frac{d \arcsin(n_a/n_{\Pi})}{dn_a} = \frac{1}{\sqrt{n_{\Pi}^2 - n_a^2}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что сближение коэффициентов преломления подложки и аналита увеличивает чувствительность сенсора. Например, если среда-аналит имеет $n_a = 1,33$, то $S_{n_a} = 95^\circ/\text{RIU}$. Известно [1], что возможно достичь чувствительности $200^\circ/\text{RIU}$, однако в этом случае следят за узким провалом вблизи минимума (для алюминия этот провал шире по сравнению с золотом и серебром). Чувствительность увеличивается за счёт свойств металла, что может быть объяснено с помощью моделей МСС, МПП или теорией поверхностных плазмонных резонансов в плёнке [2]. Иными словами, скорость перестройки минимума угловой зависимости происходит быстрее, чем пика при угле ПВО.

Результаты экспериментов. Для получения согласованной плёнки реализован вариант с нанесением алюминия на кварцевую подложку ($n_a = 1,46$), размещённую на оптическом контакте на гипотенузной грани прямоугольной стеклянной призмы ($n_{пр} = 1,52$) (рис. 4, *a*). Угол падения на грань призмы нормальный, свет имел p -поляризацию и падал на плёнку под углом $47,4^\circ$, преломляясь на границе призма—подложка.

Плёнка алюминия изготавливалась методом термического испарения в вакууме. В процессе осаждения металлической плёнки с помощью системы оптического контроля фиксировался коэффициент отражения R_p . Приняв скорость распыления металла постоянной во времени, можно предположить, что время напыления пропорционально толщине плёнки (рис. 5, *a*). Напыление велось не до минимума, который в данном случае составляет величину 0,24, а до 0,57. Соответствующие величины зависимости для угла $\theta_{п} = 47,4^\circ$ (см. рис. 2, *a*) составляют 0,16 и 0,35 (точка *A*). Отличие экспериментальной зависимости от расчётной может быть обусловлено несовпадением коэффициента преломления реального металлического слоя с используемым при моделировании. Заметное влияние может оказывать промежуточный тонкий слой между призмой и металлом из-за неидеально обработанной поверхности или слой между металлом и анализом (вакуумом), образованный из-за окисления или изменения свойств металла от контакта с воздухом [12]. Наилучшим вариантом было бы использовать для изготовления согласованной плёнки сходящийся пучок света аналогично схеме на рис. 4, *d* при фиксировании углового распределения на матрице или линейке фотодетекторов непосредственно в процессе напыления.

Изготовленная металлическая плёнка исследовалась на экспериментальной установке (рис. 4, *b*). Измерялись коэффициенты отражения и пропускания плёнки при нормальном падении света со стороны подложки и со стороны воздуха. Далее измерялась угловая зави-

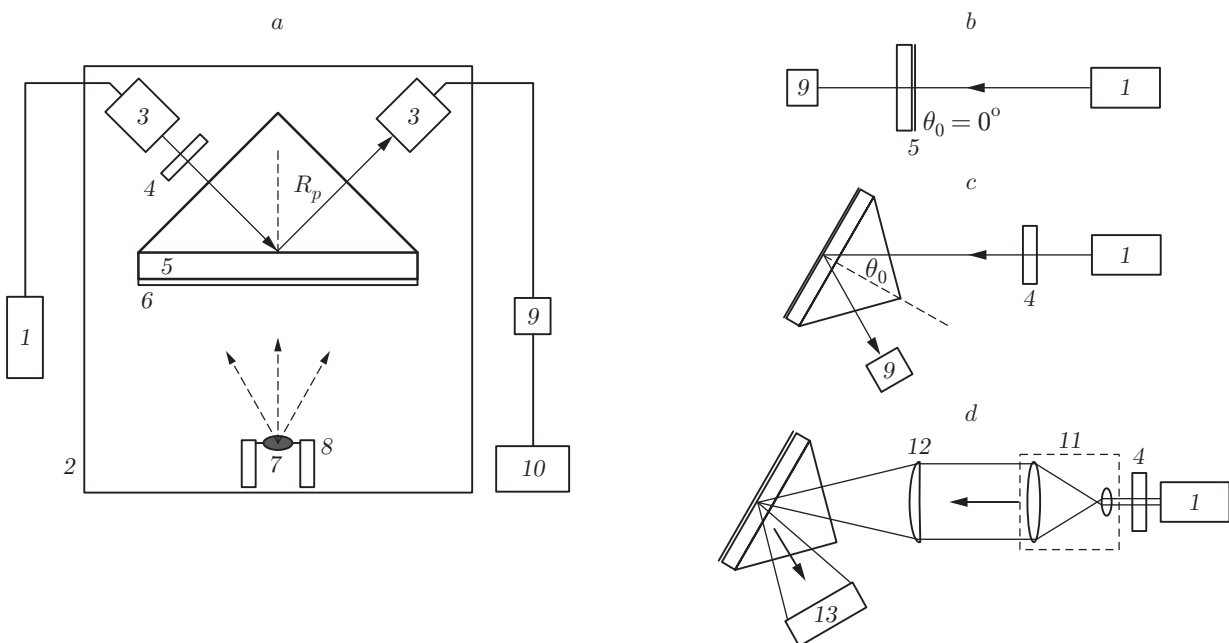


Рис. 4. Экспериментальные схемы: *a* — контроля R_p металл-диэлектрических структур в процессе осаждения, *b* — измерения свойств металлических плёнок, *c* — угловых зависимостей R_p в схеме Кречмана, *d* — угловой развёртки на фотоматрице (1 — лазер на длине волны 532 нм, 2 — вакуумная камера, 3 — волоконные коллиматоры, 4 — поляризатор, 5 — подложка, 6 — напыляемый слой, 7 — гранула Al (ZnS), 8 — тигель, 9 — фотоприёмник, 10 — компьютер, 11 — расширитель пучка, 12 — цилиндрическая линза, 13 — фотоматрица)

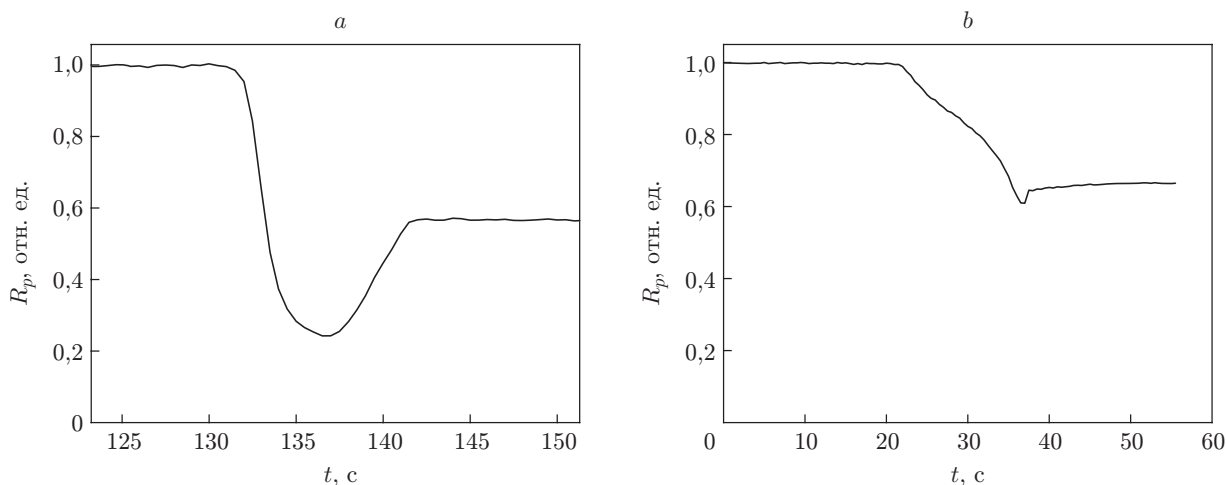


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения R_p от времени в процессе осаждения: *a* — алюминиевой плёнки, *b* — слоя ZnS на алюминиевую плёнку

симось R_p плёнки (рис. 4, *c*). Экспериментальную зависимость коэффициента R_p алюминиевой плёнки от угла демонстрирует рис. 6 (треугольники). Приближённая теоретическая зависимость, рассчитанная по модели МСС, представлена штриховой линией и получена методом подбора неизвестных параметров с помощью функции `scipy.optimize.curve_fit` из пакета SciPy для языка программирования Python, в которой методом наименьших квадратов производится поиск оптимальных комплексного коэффициента преломления плёнки и её толщины. Эти параметры для заданного набора экспериментальных точек следующие: $n_{МП} = 1,32 - 5,67i$, $d_{МП} = 11,6$ нм. Коэффициент преломления отличается от табличного и является некоторой эффективной величиной, если учесть, что на угловую зависимость может оказывать влияние слой оксида алюминия толщиной в несколько нанометров [12], приводящий к изменению формы зависимости, аналогично случаю при нанесении диэлектрика на металлическую плёнку, как рассмотрено выше (см. рис. 2, *c*).

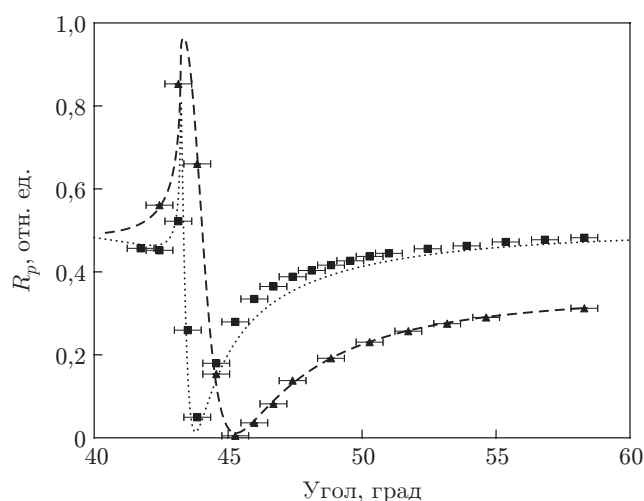


Рис. 6. Угловая зависимость коэффициента отражения R_p (штриховая и пунктирная линии — расчётные зависимости по модели МСС для металла и металл-диэлектрической структуры соответственно)

Для повышения остроты пиков угловой зависимости на алюминиевую плёнку термическим испарением в вакууме наносился слой ZnS (рис. 5, *b*). При нанесении контроль вёлся за коэффициентом отражения R_p под углом, меньшим угла ПВО, но близким к нему. Относительный минимум отражения составил около 0,6, что свидетельствует об угле контроля меньше угла ПВО и по форме ближе к зависимости для 43° (см. рис. 2, *d*). Также видно, что при нанесении диэлектрика минимум R_p был немного пройден. В результате получилась зависимость от угла, представленная квадратами на рис. 6. Расчётная зависимость (пунктирная линия) строилась для тех же параметров, что и для плёнки без покрытия. Подбиралась толщина слоя ZnS, которая получилась равной 111,8 нм. Совпадение расчётной и экспериментальной зависимостей достаточно хорошее. Угловая ширина пика резонанса уменьшилась примерно в 8 раз — до $0,14^\circ$.

Измерение угловой зависимости на установке (см. рис. 4, *c*) не обеспечивало приемлемой точности, так как использовалась вращательная подвижка с точностью $0,5^\circ$. Поэтому для прецизионного измерения в районе угла ПВО была собрана схема (см. рис. 4, *d*), на которой угловая зависимость фиксируется на фотоматрице зеркального фотоаппарата "Canon EOS 1100D". Изображение с фотоматрицы, взятое только для пикселей с зелёными светофильтрами, показано на рис. 7, *a*. Фотоматрица имела полные размеры 4272×2848 пикселей ($22,2 \times 14,7$ мм). Размер одного пикселя 5,2 мкм. Апертура цилиндрической линзы 12 (см. рис. 4) равнялась 1 см, а фокальное расстояние — 7 см. Диапазон углов падения на катет призмы $\pm 1/14$ рад, что эквивалентно развёртке на фотоматрице $5,8^\circ$ (с учётом сред призмы и подложки). На один пиксель приходится $(1,4 \cdot 10^{-3})^\circ$.

В результате интерференции на непросветлённых оптических элементах схемы из-за высокой продольной когерентности лазера возникал паразитный шум. Для устранения

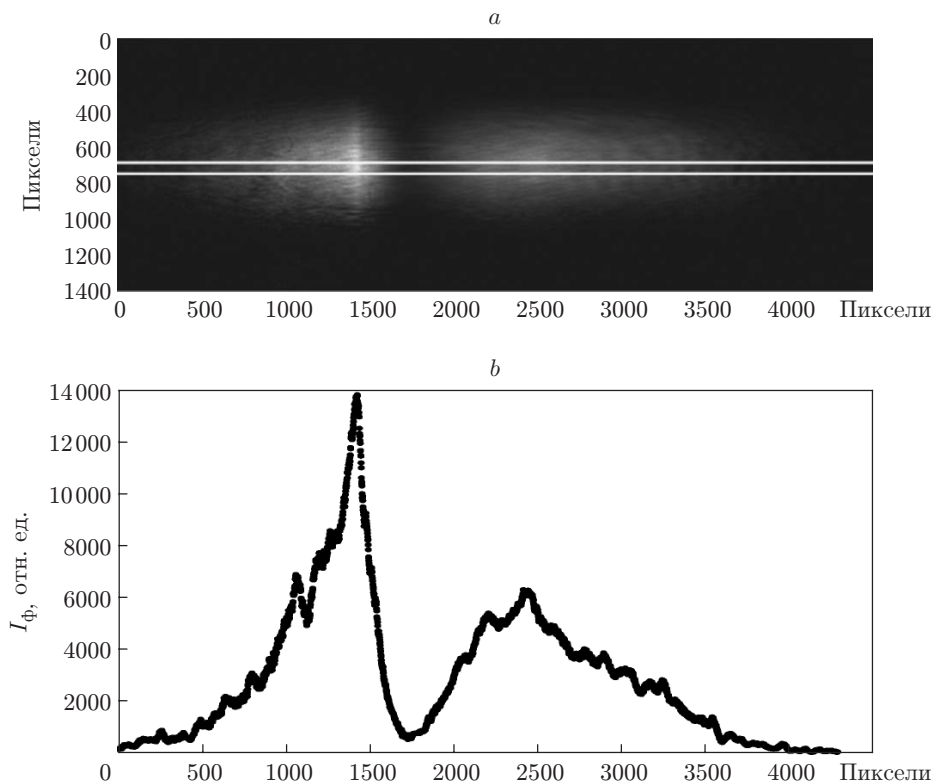


Рис. 7. Угловая развёртка коэффициента отражения R_p : *a* — на фотоматрице, *b* — интенсивность (14 бит), усреднённая по 40 точкам

этого эффекта производилось усреднение вдоль вертикальной оси по нескольким рядам пикселей. Область усреднения показана белыми линиями (см. рис. 7, *a*). В таком случае получается зависимость интенсивности I_{ϕ} вблизи угла ПВО (рис. 7, *b*). Заметим, что угловая зависимость соответствует пучку с гауссовским профилем, тогда как рис. 2, *b* и рис. 6 представляют угловые зависимости от пучка с равномерным распределением по апертуре линзы.

Проведём оценку уровня предельного детектирования данного сенсора. Под пределом детектирования δn сенсора подразумевается отношение минимально разрешимой регистрирующим прибором величины $\delta\chi$ (длины волны, угла, фазы и т. п.) к чувствительности $S_{n_a} = d\chi/dn_a$, соответствующей измеряемой величине $\delta n = \delta\chi/S_{n_a}$ [1]. Оценку можно провести на основе расчётных данных (см. рис. 3) по определению чувствительности. Минимально разрешимая величина находится из зависимости на рис. 7, *b*. Характерная ширина пика вблизи угла ПВО равна 100 пикселям фотоматрицы. Если использование методов аппроксимации позволит определить положение пика с точностью на два порядка меньше полуширины (т. е. с точностью порядка пикселя), то оценочный предел детектирования составит для воздуха $2,6 \cdot 10^{-5}$ RIU, а для жидкости ($n_a = 1,33$) — $1,5 \cdot 10^{-5}$ RIU. Разрешающую способность можно увеличить на порядок, если в схеме перед фотоматрицей (см. рис. 4, *d*) поместить рассеивающую линзу для уменьшения диапазона углов, попадающих на неё, при этом будет снижен динамический диапазон измерения n_a .

Заключение. С применением численного моделирования разработан и экспериментально реализован метод оптимизации сенсорной структуры на основе алюминия и диэлектрического слоя сернистого цинка (Al + ZnS). Численно исследована зависимость коэффициента отражения (*p*-поляризация) от толщины слоя алюминия при разных углах падения света. Показано изменение угловой зависимости коэффициента отражения от толщины алюминиевой плёнки. В соответствии с результатами расчётов определены основные параметры эксперимента: толщина согласованного алюминиевого слоя, для которого угловая зависимость будет иметь высокий контраст; условия контроля для получения согласованного диэлектрического слоя сульфида цинка, при котором угловая зависимость коэффициента отражения вблизи угла НПВО уменьшает свою ширину.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук Н. Д. Голдиной за обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shalabney A., Abdulhalim I.** Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors // *Laser Photon. Rev.* 2011. **5**, N 4. P. 571–606. DOI: 10.1002/lpor.201000009.
2. **Surface Plasmon Resonance Based Sensors** /Ed. J. Homola. Springer Ser. Chem. Sens. Biosens. 2006. Vol. 4. 251 p.
3. **Salamon Z., Macleod H. A., Tollin G.** Coupled plasmon-waveguide resonators // *Biophys. Journ.* 1997. **73**, N 5. P. 2791–2797.
4. **Zhou Y., Zhang P., He Y. et al.** Plasmon waveguide resonance sensor using an Au–MgF₂ structure // *Appl. Opt.* 2014. **53**, N 28. P. 6344–6350.
5. **Троицкий Ю. В.** Современное состояние и перспективы отражательной многолучевой интерферометрии // *Автометрия.* 1985. № 1. С. 96–114.
6. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. **Kabashin A. V., Nikitin P. I.** Interferometer based on a surface plasmon resonance for sensor applications // *Quant. Electron.* 1997. **27**, N 7. P. 653–654.

8. **Rakić A. D., Djurišić A. B., Elazar J. M., Majewski M. L.** Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices // *Appl. Opt.* 1998. **37**, N 22. P. 5271–5283.
9. **Lecaruyer P., Canva M., Rolland J.** Metallic film optimization in a surface plasmon resonance biosensor by the extended Rouard method // *Appl. Opt.* 2007. **46**, N 12. P. 2361–2369.
10. **Троицкий Ю. В.** Одночастотная генерация в газовых лазерах. Новосибирск: Наука, 1975. 160 с.
11. **Goldina N. D.** Frustrated total internal reflection from thin-layer structures // *Optics and Spectroscopy*. 2009. **106**, N 5. P. 748–752.
12. **Barchiesi D.** Numerical retrieval of thin aluminium layer properties from SPR experimental data // *Opt. Express*. 2012. **20**, N 8. P. 9064–9078.

Поступила в редакцию 12 января 2015 г.
