

Е.В. Костюкевич, С.А. Костюкевич

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

Проведен анализ технологических условий изготовления преобразователей на основе ППР: тип подложки для пленки золота (кварц/стекло), наличие подслоя (Cr), улучшающего адгезию пленки золота к подложке, а также низкотемпературный отжиг пленки золота. С учетом результатов структурных исследований сделан вывод о влиянии технологических условий на такие эксплуатационные характеристики сенсорных приборов ППР, как чувствительность и стабильность. Исследованы форма резонансной кривой ППР, долговременная стабильность значения резонансного угла и индикатриса рассеянного света. Показано, что применение температурного отжига золотых пленок при 120 °С обеспечивает оптимальные рабочие характеристики и высокую чувствительность преобразователя ППР, а также бездефектное формирование защитных наноразмерных слоев благодаря отсутствию мелкомасштабной шероховатости поверхности.

Ключевые слова: тонкие пленки золота, температурный отжиг, резонансная кривая поверхностного плазмонного резонанса (ППР), индикатриса рассеянного света, контактный угол смачивания водой.

ВВЕДЕНИЕ

Для оптического преобразователя на основе эффекта поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в тонкой пленке золота [1] характерна существенная зависимость его характеристик от технологических условий изготовления. При возбуждении поверхностного плазмона (ПП) в геометрии ослабленного полного отражения по схеме Кретчмана как падающий, так и отраженный световой поток проходят через объем пленки металла. Шероховатость поверхности и неоднородность объема пленки будут влиять на значение угла ППР и форму полосы поглощения [2], приводить к искажению резонансной кривой ППР, уменьшению чувствительности сенсорного прибора по отношению к адсорбированной массе молекул и ошибкам в расчетах оптических параметров пленки металла. С другой стороны, поверхностные свойства пленок будут определять механизмы адсорбции и формирования наноразмерных молекулярных слоев на рабочей поверхности преобразователя ППР. Поэтому не возникает сомнения в том, что использование тонкопленочных металлических покрытий в сенсорном приборостроении требует их тщательной характеристики с точки зрения связи технология – свойства [3].

В предыдущей работе [4] мы исследовали морфологические и топографические особенности тонкопленочных структур Cr-Au, нанесенных методом термического испарения в вакууме на полированные кварцевые подложки без подогрева и модифицированных низкотемпературным отжигом в интервале температур 80–250 °С. Было показано, что пленки имеют поликристаллическую структуру с преимущественной ориентацией кристаллитов в направлении $\langle 011 \rangle$, с ростом температуры отжига текстура пленок становится более выраженной и размер зерен увеличивается. Максимальная вариация рельефа поверхности составляет 2,5 нм, а размеры зерен в плоскости подложки находятся в диапазоне 20–200 нм. Температурный отжиг до ≈ 120 °С не приводит к существенному изменению среднего размера кристаллитов, а лишь изменяет рельеф поверхности пленки Au, существенно уменьшая мелкомасштабную шероховатость. При температуре отжига выше 150 °С наблюдается фазовый переход, обусловленный процессами перекристаллизации и приводящий к формированию кристаллитов большего размера и сглаживанию поверхностного рельефа.

Основной задачей представляемой работы является проведение анализа влияния низкотемпературного отжига покрытия Au с учетом структурных исследований на эксплуатационные характеристики преобразователя ППР.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для напыления пленок использовали полированные кварцевые подложки с низкой среднеквадратической шероховатостью (СШ) поверхности ($\sim 1,1$ нм). Подложки механически очищали, используя мелкодисперсный порошок (Regipol Vitesse), затем подвергали химической обработке (выдержка в хромовой смеси, содержащей 10 г $K_2Cr_2O_7$ на 350 мл H_2SO_4 , с последующей промывкой в большом количестве дистиллированной воды и использованием ультразвуковой ванны); финишную обработку проводили в тлеющем разряде непосредственно перед напылением [5].

Пленки золота толщиной (40 ± 5) нм наносили методом термического испарения в вакууме (ВУП-4, остаточное давление паров $4 \cdot 10^{-4}$ Па, скорость напыления 40-50 $\text{\AA}/\text{с}$) на улучшающий адгезию слой хрома (толщина ~ 1 нм) без подогрева подложки. Полученные образцы подвергали термическому отжигу на воздухе в течение 30 мин в интервале температур 80–250 $^{\circ}\text{C}$.

Спектроскопия ППР на воздухе проведена в конфигурации Кретчмана с использованием гониометра Г-5М. Волну поверхностного плазмона возбуждали в пленке золота на кварцевой/стеклянной подложке, которую закрепляли на грани стеклянной призмы (угол 45° , коэффициент преломления 1.52), используя глицерин (коэффициент преломления 1.45) в качестве иммерсионной жидкости. Резонансное связывание между фотонами возбуждающего света и электронной плазмой на внешней поверхности пленки металла происходило в результате падения луча света He-Ne лазера ($\lambda = 632.8$ нм) со стороны призмы и сканирования внутренней стороны металлической пленки в диапазоне углов больше критического. Сигнал, отраженный от металлической поверхности, фиксировали фотодетектором ФД-263.

Измерения индикатрисы рассеянного света выполнены на автоматизированной экспериментальной установке, где в качестве тестирующего излучения использовали нормально падающий на поверхность исследуемого образца луч света He-Ne лазера (632.8 нм, 2 мВт) диаметром 100 мкм. Интенсивность рассеянного света регистрировали с помощью фотоэлектронного умножителя РМТ. Угловую зависимость интенсивности рассеянного света получали за счет поворота фотоприемной части относительно точки измерения с помощью шагового двигателя. Полученную зависимость нормировали на телесный угол фотоприемника, а также на интенсивность падающего пучка света, отраженного от эталонной кремниевой пластины после ослабления калиброванным светофильтром. Для изменения точки измерения ячейку с тестируемым образцом можно было перемещать с помощью двухкоординатного столика, отсчетные шкалы которого обеспечивали точность ± 10 мкм.

Измерения контактного угла смачивания водой выполнены на воздухе при комнатной температуре с использованием оригинальной установки на основе приставки к микроскопу ММИ-2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние типа подложки демонстрируют резонансные кривые ППР (рис. 1), снятые на воздухе при комнатной температуре для пленок Au, нанесенных на подложки из стекла К-8 и кварца с различной шероховатостью поверхности.

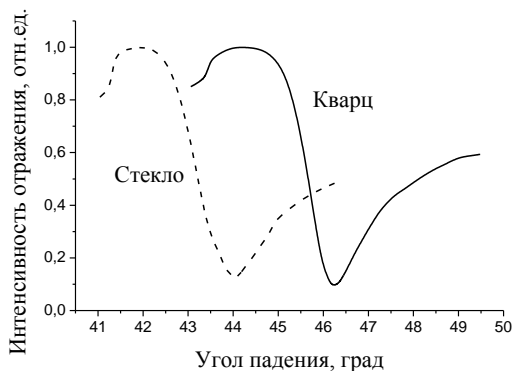


Рис. 1. Резонансные кривые ППР (воздух) для пленок золота с подслоем хрома, нанесенных на стеклянную и кварцевую подложки без подогрева.

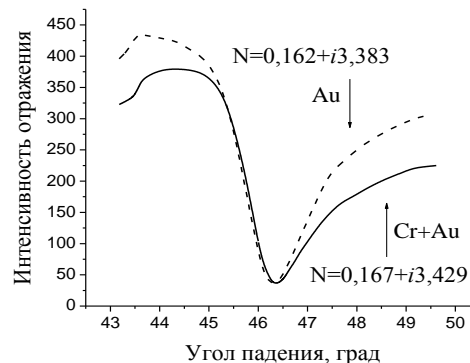


Рис. 2. Резонансные кривые ППР для пленок золота с подслоем хрома и без него, нанесенных на кварцевые подложки без подогрева.

Полученные данные свидетельствуют, что уменьшение коэффициента преломления подложки от 1.51 для стекла до 1.46 для кварца приводит к смещению положения минимума кривой ППР $\theta_{\text{ППР}}$ ($\approx 2.20^\circ$) в область больших углов в соответствии с рассчитанным значением ($\approx 2.14^\circ$). При этом большая СШ поверхности подложек из стекла (~ 2 нм) по сравнению с таковой из кварца ($\sim 1,1$ нм) приводит к росту значения минимума резонансной кривой ППР R_{min} (от 0.096 до 0.129 отн. ед.) и увеличению полуширины резонансной кривой ППР ΔR (от 2.11° до 2.52°) в соответствии с теоретическими представлениями. Таким образом, с точки зрения использования рассматриваемых структур в качестве преобразователей ППР использование кварцевых подложек является предпочтительным.

Известно, что благородные металлы проявляют плохую адгезию к диэлектрическим подложкам, поэтому для ее улучшения в тонкопленочной технологии обычно используют промежуточные слои таких металлов, как вольфрам, молибден и хром. В качестве промежуточного слоя для увеличения сцепления с подложкой наибольшее распространение получил хром в связи с устойчивостью к механическим воздействиям, химической и термической стабильностью.

На рис. 2 приведены угловые зависимости отражения ППР от структуры кварцевая пластина – металлическая пленка – воздух, где в качестве металлического слоя выступают: пленка Au (45 нм) и последовательно напыленные пленки Cr с массовой толщиной около 1 нм (адгезивный слой) и Au (45 нм).

Из рисунка видно, что резонансные кривые ППР незначительно отличаются в области минимума (смещение составляет ≈ 0.06 град). В то же время кривая, соответствующая структуре с подслоем хрома, имеет большую полуширину (разница составляет 0.5 град), а также меньшую величину отраженного сигнала при переходе в область полного внутреннего отражения и при больших углах, т.е. на “плечах” резонансной кривой ППР.

В этом случае систему Cr+Au можно рассматривать как один металлический слой с эффективными оптическими константами [6]. На основе полученных экспериментальных данных для исследуемых покрытий были рассчитаны величины комплексного коэффициента преломления методом подгонки теоретических резонансных кривых ППР к экспериментально измеренным [7] в рамках однослойной оптической модели. Для пленки золота $N_{\text{Au}} = 0,162 + i 3,383$, для пленки золота с подслоем хрома $N_{\text{Cr+Au}} = 0,167 + i 3,429$.

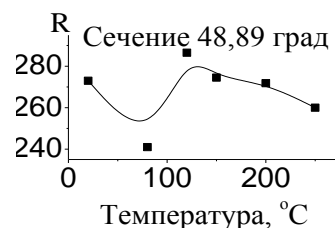
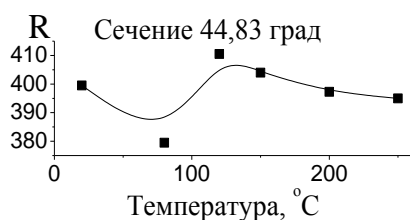
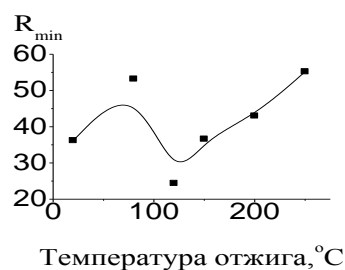
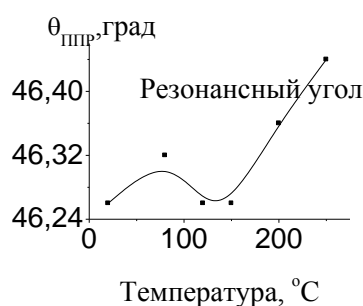
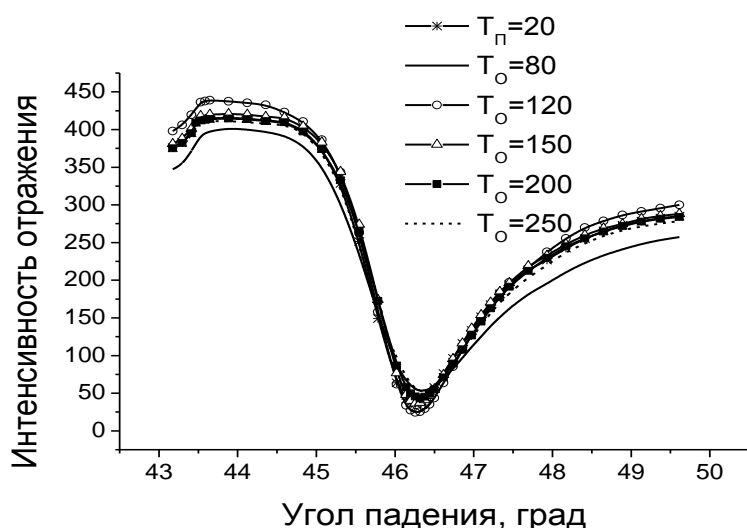


Рис. 3. Резонансные кривые ППР (воздух) для образцов, полученных при температуре 20 °С и отожженных в температурном диапазоне 80–250°С.

Далее проведен анализ резонансных кривых ППР (воздух) для покрытий $\text{Cr}+\text{Au}$, полученных при температуре подложки $T_{\text{п}} = 20$ °С и последующим температурным отжигом (T_{o}) на воздухе в диапазоне 80–250 °С (рис. 3).

В целом, резонансные кривые схожи между собой. В частности, процедура отжига приводит к скачкообразному изменению R_{min} с минимальным значением при температуре 120 °С и квазипостоянному значению $\theta_{\text{ППР}}$ с переходом к нарастанию при температурах выше 150 °С. Изменения интенсивности отражения в области полного внутреннего отражения и при больших углах характеризуются немонотонной зависимостью, достигая максимального значения при 120 °С. Ход вышеперечисленных зависимостей определяется особенностями поверхностной структуры пленок золота и зависит от соотношения оптических констант металла $n_{\text{М}}$ и $k_{\text{М}}$. Следовательно, минимальные значения R_{min} и ΔR , а также максимальное отражение на “плечах” резонансной кривой ППР, характерные для образцов, отожженных при 120 °С, обеспечивают наилучшие эксплуатационные характеристики преобразователей на основе ППР.

Кроме того, данные по интегральному рассеянию света исследуемыми тонкими пленками золота в условиях возбуждения ППР (рис. 4) свидетельствуют о том, что потери энергии при возбуждении поверхностных поляритонных состояний также минимальны в образцах, отожженных при температуре около 120 °С.

Для прогнозирования стабильной работы сенсорного прибора необходимо проводить исследования долговременной стабильности резонансных кривых ППР, а именно, величины резонансного угла ($\theta_{ППР}$), который определяет базовую линию. Поскольку температурный отжиг металлических пленок приводит к формированию структуры с термодинамически более устойчивым состоянием [8], которому соответствуют и более стабильные оптические свойства [9], была исследована кинетика изменения значения резонансного угла в течение 100 дней при комнатных условиях в воздушной среде для пленок золота, отожженных при температуре 120 и 150 °С.

Следует отметить, что представленные в экспериментах подложки были выбраны на основе анализа топографических особенностей поверхности поликристаллических пленок золота [4]. При температуре отжига 120 °С поверхность кристаллитов сглаживается вследствие исчезновения мелкомасштабных изломов, а при 150 °С происходит фазовый переход в системе, приводящий к более упорядоченной структуре поверхности, увеличению размера кристаллитов и сглаживанию всего поверхностного рельефа. Значения резонансного угла, измеренные в течение 100 дней на исследуемых пленках золота, приведены таблице 1.

Как следует из приведенных значений, величина $\theta_{ППР}$ меняется в течение всего времени исследования. Нестабильность исследуемых пленок во время первых трех суток после изготовления связана, по-видимому, с релаксацией остаточных механических напряжений. Затем стабильность сохраняется в течение пяти дней. Вместе с тем, одинаковый для всех образцов характер релаксации в последующие дни может быть связан с адсорбцией органических молекул на поверхности пленки из газовой фазы. Таким образом, исследования кинетики старения преобразователей ППР на основе пленок золота показали, что необходимы дополнительные меры по стабилизации его характеристик даже при условии его работы в воздушной среде.

Тем более, тонкие пленки золота проявляют тенденцию к изменению физико-химических характеристик при длительной работе в жидкой среде, несмотря на достаточно высокую химическую инертность массивного золота. Для объяснения изменения оптических параметров тонких пленок необходимо учитывать не только изменение параметров верхнего слоя, но и возможность проникновения водных растворов в межкристаллическое пространство пленок с поликристаллической структурой. При этом, учитывая малую

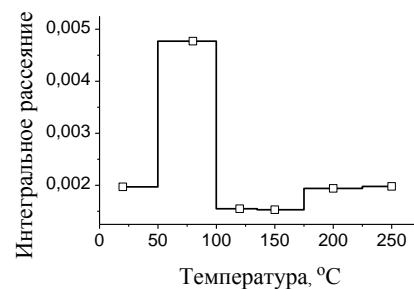


Рис. 4. Интегральное рассеяние света тонкими пленками золота, модифицированными температурным отжигом в диапазоне 80–250 °С, полученное при условии возбуждения ППР.

Таблица 1. Изменение положения резонансного угла со временем для пленок золота, подвергнутых температурному отжигу при 120 и 150 °С.

Характеристика измеряемых образцов	Значение резонансного угла (град)				
	1-й день	3-й день	7-й день	30-й день	100-й день
Без отжига	45,96	46,08	46,08	46,14	46,26
Температура отжига 120 °С	46,08	46,14	46,14	46,26	46,32
Температура отжига 150 °С	46,02	46,08	46,08	46,14	46,20

толщину пленок и технологические трудности получения покрытий без пор, варьирование только лишь условий термического напыления и отжига недостаточно для получения чувствительных элементов ППР, надежно функционирующих в водной среде. Для предотвращения старения тонких поликристаллических пленок золота необходимо применять переходные слои, способные защитить поверхность и стабилизировать параметры преобразователя, причем толщина переходного слоя должна быть много меньше глубины проникновения волны поверхностного плазмона во внешнюю среду (100–200 нм для излучения в видимой области спектра).

В качестве защитного слоя чувствительного элемента ППР используют самособирающиеся молекулярно-организованные монослои с контролируемым составом, структурой и толщиной [11]. Наибольшее распространение получили слои на основе функционализированных меркаптанов, в частности, алифатических тиолов ($\text{HS}-(\text{CH}_2)_n-\text{X}$) благодаря простой технологии получения (методом длительной самопроизвольной хемосорбции из раствора), стабильности и функциональному разнообразию. Плотнупакованное молекулярное покрытие обеспечивает пространственное экранирование металлической поверхности на десятки ангстрем (длина C–H связи $\sim 1,1 \text{ \AA}$), что не оказывает существенного влияния на чувствительность сенсора, а терминальные группы тиола определяют ее физико-химические свойства.

Применяя модификацию поликристаллических пленок золота додекантиолом ($\text{HS}(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$ – гидрофобное покрытие), можно существенно стабилизировать дрейф положения минимума ППР (базовой линии прибора) при работе в жидкой среде [10], что, скорее всего, связано с проникновением воды по порам и границам микрокристаллов пленки золота. Поэтому оптимизация чувствительного элемента ППР была проведена на основе измерений контактного угла смачивания водой и исследований кинетики изменения величины резонансного угла с течением времени для пленок золота, полученных термическим испарением в вакууме без подогрева с последующим низкотемпературным отжигом и модифицированных додекантиолом.

В таблице 2 приведены данные измерений контактного угла смачивания водой для модифицированных додекантиолом пленок золота без отжига и подвергнутых температурному отжигу при температуре 120 и 150 °С, а также немодифицированных пленок золота.

Поскольку гидрофобная поверхность характеризуется углом смачивания водой порядка 100° [12], величины углов смачивания водой, полученные для исследуемых образцов (102°–104°), свидетельствуют о формировании плотноупакованных монослойных покрытий на всех подложках. Однако структурные различия покрытий не проявляются в результате применения данного метода.

Исследование долговременной стабильности пленок золота, модифицированных додекантиолом, были проведены на воздухе с помощью измерения резонансных кривых ППР. В таблице 3 приведены данные изменения значения резонансного угла со временем для модифицированных додекантиолом пленок золота без отжига и подвергнутых температурному отжигу при температуре 120 и 150 °С.

Таблица 2. Контактный угол смачивания водой (θ).

Технология получения образцов	Пленка Au, полученная при $T_{II} = 20 \text{ °C}$	Пленка Au без отжига с пленкой додекантиола	Пленка Au, отожженная при $T_o = 120 \text{ °C}$, с пленкой додекантиола	Пленка Au, отожженная при $T_o = 150 \text{ °C}$, с пленкой додекантиола
θ (град)	83±1	102±1	104±1	103±1

Таблица 3. Изменение положения резонансного угла со временем для пленок золота, модифицированных додекантиолом.

Характеристика измеряемых пленок золота	Значение резонансного угла (град)				
	1-й день	3-й день	7-й день	30-й день	100-й день
Без отжига	44,12	44,17	44,21	44,21	44,17
Температура отжига 120 °С	44,17	44,17	44,17	44,17	44,17
Температура отжига 150 °С	44,26	44,17	44,21	44,26	44,21

Из таблицы видно, что сдвига резонансного угла не происходит с течением времени только в том случае, если поликристаллические пленки золота, напыленные без подогрева подложки, были подвергнуты температурному отжигу при $T \sim 120$ °С, а значит, только на таких подложках происходит формирование высокоупорядоченного, бездефектного монослоя тиолата золота и полная стабилизация характеристик преобразователя. Поскольку для таких образцов характерным является отсутствие мелкомасштабной шероховатости поверхности, то вероятно, причиной формирования дефектного монослоя тиолата золота может служить пленка золота, содержащая мелкомасштабные фрактальные структуры, сравнимые с размером молекулы тиола (для додекантиола $\sim 1,7$ нм). К сожалению, метод поверхностного плазмонного резонанса позволяет получить только эффективные значения оптических констант и средней толщины слоя, адсорбированного на поверхности пленки золота.

Вместе с тем метод, основанный на анализе угловой зависимости рассеянного света, дает информацию о соответствии эффективной толщины органического слоя вариациям высот рельефа пленки золота [13]. Суть методики заключается в расчете функций спектральной плотности мощности на основании двух взаимодополняющих моделей, учитывающих рассеяние света на неоднородностях рельефа поверхности и на неоднородностях диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя [14].

Качественное совпадение функциональных зависимостей спектральной плотности мощности от пространственной частоты для двух длин волн (441 и 632 нм) позволило сделать вывод о корреляции в противофазе между распределением толщины тиольного покрытия и высоты рельефа поверхности золота [15]. В области вершин кристаллитов формирование органического монослоя происходит в соответствии с классическими представлениями для гладких монокристаллических поверхностей, тогда как на вогнутых участках поверхности (область впадин) могут наблюдаться нарушения плотной гексагонально упорядоченной структуры тиолата, чему способствуют стерические ограничения, а также скопление мелких дефектов тонких пленок золота в областях межкристаллических границ, соизмеримых с размером молекулы додекантиола. Поэтому толщина диэлектрического слоя тиола в таких областях может значительно превышать размер, характерный для монослойного покрытия, вследствие перекрытия алифатических цепей.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ технологических условий изготовления преобразователей на основе ППР: тип подложки для пленки золота (кварц/стекло), наличие подслоя (Cr), улучшающего адгезию пленки золота к подложке, а также низкотемпературный отжиг пленки золота. С учетом результатов структурных исследований сделан вывод о влиянии технологических условий на такие эксплуатационные характеристики сенсорных приборов ППР, как чувствительность и стабильность.

Количественный анализ влияния шероховатости поверхности подложки и присутствия подслоя хрома на форму резонансной кривой ППР показал, что увеличение СШ подложки с 1,1 до 2 нм приводит к росту значения минимума кривой ППР (от 0,096 до 0,129 отн. ед.) и увеличению полуширины резонансной кривой ППР на 0,41 градуса. Применение подслоя хрома не влияет на резонансную кривую в области минимума, а лишь приводит к росту полуширины (на 0,5 град) и уменьшает величину отраженного сигнала на “плечах” ППР кривой.

На основании результатов исследования долговременной стабильности значения резонансного угла, который определяет базовую линию приборов ППР, установлено, что процедура низкотемпературного отжига пленок золота не приводит к стабилизации их характеристик.

Исследование формы резонансных кривых ППР и интегрального рассеяния света исследуемыми пленками золота в условиях возбуждения ППР показали, что применение температурного отжига золотых пленок при 120 °С обеспечивает оптимальные рабочие характеристики и высокую чувствительность преобразователя ППР, а также бездефектное формирование наноразмерных слоев, отвечающих за стабилизирующие и пассивирующие качества чувствительной поверхности, вследствие отсутствия мелкомасштабной шероховатости поверхности.

E.V. Kostyukevych, S.A. Kostyukevych

OPTIMIZATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS INHERENT TO TRANSDUCERS BASED ON SURFACE PLASMON RESONANCE

Performed in this work is the analysis of technological conditions for manufacturing SPR transducers, namely: type of substrate for gold films (silica/glass), presence of sub-layer (Cr) improving gold film adhesion to the substrate, as well as low-temperature annealing of the gold coating. With account of results of morphological investigations, made is the conclusion concerning the influence of surface roughness on such operational characteristics of SPR sensors as sensitivity and stability. Also investigated were the shape of SPR resonance curve, long-term stability of the resonance angle value and indicatrix of scattered light. It has been shown that thermal annealing of gold films at the optimal temperature 120 °С provides improved operation characteristics and high sensitivity of the SPR transducer as well as defectless formation of protective nanodimensional layers due to the absence of small-scale surface roughness.

Keywords: gold thin films, thermal annealing, resonance curve of surface plasmon resonance (SPR), indicatrix of scattered light, contact angle of wetting with water.

1. *Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л.* Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. – К.: Наукова думка, 1989.
2. *Поверхностные поляритоны* / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. – М.: Наука, 1985.
3. *Noa X.D., Kirk A.G., Tabrizian M.* Towards integrated and sensitive surface plasmon resonance biosensors: A review of recent progress // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2007. – **23**. – P. 151-160.
4. *Костюкевич Е.В., Костюкевич С.А., Шепелявый П.Е.* Реконструкция поверхности поликристаллических пленок золота под влиянием температурного отжига // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. – 2013. – **48**. – С. 121-129.
5. *Полтавцев Ю.Г., Князев А.С.* Технология обработки поверхностей в микроэлектронике. – К.: Техника, 1990.
6. *Rengevich O.V., Shirshov Y.M., Ushenin Y.V., Beketov A.G.* Separate determination of thickness and optical parameters by surface plasmon resonance: accuracy consideration // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. – 1999. – **2(2)**. – P. 28-35.
7. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981.
8. *Точицкий Э.И.* Кристаллизация и термообработка тонких пленок. – Минск: Наука и техника, 1976.
9. *Костюк В.П., Шкляревский И.Н.* Влияние условий приготовления серебряных и медных слоев на их оптические свойства // *Оптика и спектроскопия*. – 1970. – **29(1)**. – С. 195-197.
10. *Костюкевич Е.В., Христосенко Р.В., Ушенин Ю.В., Самойлов А.В., Костюкевич С.А.* Иммуносенсор поверхностного плазмонного резонанса с повышенной чувствительностью и стабильностью для

детектирования фибриногена, растворимого фибрина и *D*-димера в плазме крови человека // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2012. – **47**. – С. 72.

11. *Ulman A.* Formation and structure of self-assembled monolayers // Chem. Rev. – 1996. – **96**. – P. 1533-1554.

12. *Keller H., Schrepp W., Fuchs H.* Self-assembled organic films on gold and silver // Thin solid films. – 1992. – **210/211**. – P. 799-802.

13. *Amra C.* From light scattering to the microstructure of thin-film multilayers // Appl. Opt. – 1993. – **32**. – P. 5481-5491.

14. *Silvennoinen R., Rasanen J., Savolainen M., Peiponen K.-E., Uozumi J., Asakura T.* On simultaneous optical sensing of local curvature and roughness of metal surfaces // Sensors and Actuators A. – 1996. – **51**. – P. 117-123.

15. *Lysenko S.I., Snopok B.A., Kostyukevich E.V., Zinio S.A., Sterligov V.A., Shirshov Y.M., Venger E.F.* Light scattering of thin dielectric films: self-assembled monolayers on the surface of polycrystalline gold, In: Correlation Optics // Proc. SPIE. – 1999. – **3904**. – P. 476-487.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины
проспект Науки, 41
03028 Киев

Получено 16.05.2014