

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 535.32

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОТРАЖАЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА  
В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ**

© Н. Д. Голдина

*Институт лазерной физики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15б  
E-mail: ngold@laser.nsc.ru*

Новый вариант отражающего интерферометра для  $S$ -поляризованного света состоит из тонкой металлической плёнки, размещённой перед многослойным диэлектрическим интерферометром. От расположения металлической плёнки в узле или пучности стоячей волны, отражённой от интерферометра, зависит появление узких экстремумов (максимумов или минимумов) в спектральной или угловой зависимости коэффициента отражения.

*Ключевые слова:* многолучевой интерферометр, отражённый поляризованный свет, металлический слой.

DOI: 10.15372/AUT20210214

**Введение.** Наклонное падение света в многослойной оптике используется давно для создания поляризаторов [1]. Включение многослойных покрытий в поляризационные устройства позволило создать новый поляризатор, оперирующий при углах больше критического угла [2] с коэффициентом пропускания  $S$ -поляризованного света  $T_s \sim 1$  и коэффициентом отражения  $P$ -поляризации  $R_p \sim 1$ .

В работах [3, 4] рассмотрена 9-слойная металл-диэлектрическая структура GHLHLHLMNA при наклонном падении света под углом  $45^\circ$ . Здесь G — стеклянная призма, A — воздух, H и L — слои с высоким и низким показателями преломления соответственно, M — металлический слой. Структура HLHLHLHMN представляет собой добротный интерферометр. Одним из зеркал является граница полного внутреннего отражения (ПВО), вторым зеркалом — многослойник из 7 диэлектрических слоёв внутри структуры. Базой интерферометра для настройки на рабочую длину волны служит слой H между металлом M и воздухом A. При добавлении 7-слойного зеркала получается узкая полоса поглощения 5 нм (резкий провал) в спектральной кривой для коэффициента отражения  $S$ -поляризованного света. Интересно рассмотреть вариант, когда металлическая плёнка находится на входе в интерферометр.

**Конструирование.** В данном исследовании предлагается новая конструкция отражающего интерферометра GMHLHLHNA: металлическая плёнка размещается перед многослойным диэлектрическим интерферометром. Ограничивающими средами здесь также являются стеклянная призма G (показатель преломления  $n = 1,52$ ) и воздух A ( $n = 1,0$ ). Угол падения превышает критический ( $41^\circ$ ), расчёт сделан для угла  $44^\circ$ . Показатели преломления диэлектрических слоёв H и L равны 2,36 и 1,46 соответственно. Следует заметить, что в расчётах используется модель комплексно-проводящей поверхности, в которой металлическая плёнка вместо оптических констант  $n = 3,4$ ,  $k = 4,7$  и толщины  $h = 7$  нм характеризуется двумя параметрами: активной  $2nk\gamma$  и реактивной  $(n^2 - k^2)\gamma$  (где  $\gamma = 4\pi h/\lambda$ ) составляющими комплексной поверхностной проводимости [3].

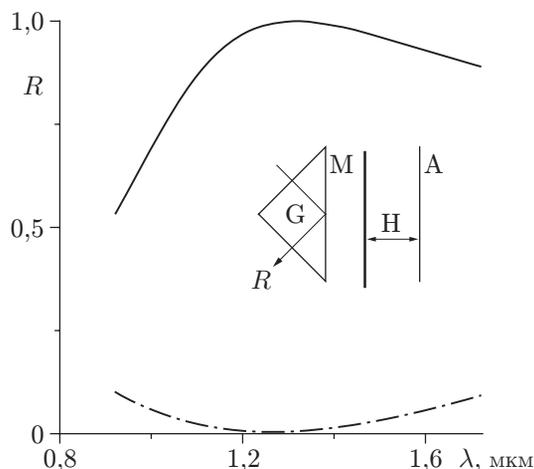


Рис. 1. Коэффициент спектрального отражения интерферометра из двух слоёв — металлической плёнки М и диэлектрического слоя Н. Сплошная кривая — толщина Н-слоя соответствует расположению М в узле стоячей волны, отражённой от границы ПВО; штрихпунктирная кривая — в пучности

Рассмотрим вначале простой вариант отражающего интерферометра (ОИ) из двух слоёв (рис. 1) по схеме ГМНА, где М — металлическая плёнка и Н — диэлектрический слой. Граница Н-слоя с воздухом является границей ПВО. Рассматривается *S*-поляризация. На рисунке приведена спектральная зависимость коэффициента отражения  $R_s$ . Сплошной линией показана зависимость  $R_s$  для толщины Н-слоя  $\delta = 0,4(\lambda_0/4)$ , штрихпунктирной — для  $\delta = 1,3(\lambda_0/4)$ , здесь  $\lambda_0 = 1,22$  мкм. В первом случае металлическая плёнка находится в узле стоячей волны, отражённой от границы ПВО, и  $R_s$  имеет максимум  $\sim 1$  для  $\lambda_0$ ; во втором случае металл находится в пучности и  $R_s$  имеет минимум, близкий к 0.

Предлагаемый вариант нового ОИ состоит во внесении между металлической плёнкой

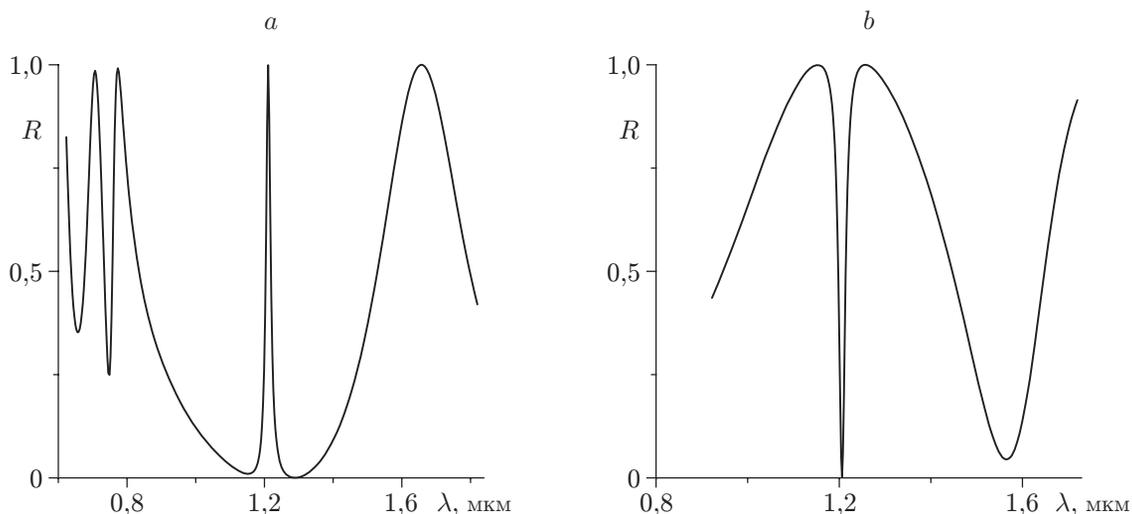


Рис. 2. Спектральные коэффициенты отражения нового варианта отражающего интерферометра: металл находится в узле стоячей волны, отражённой от внутреннего диэлектрического интерферометра (а), в пучности (b)

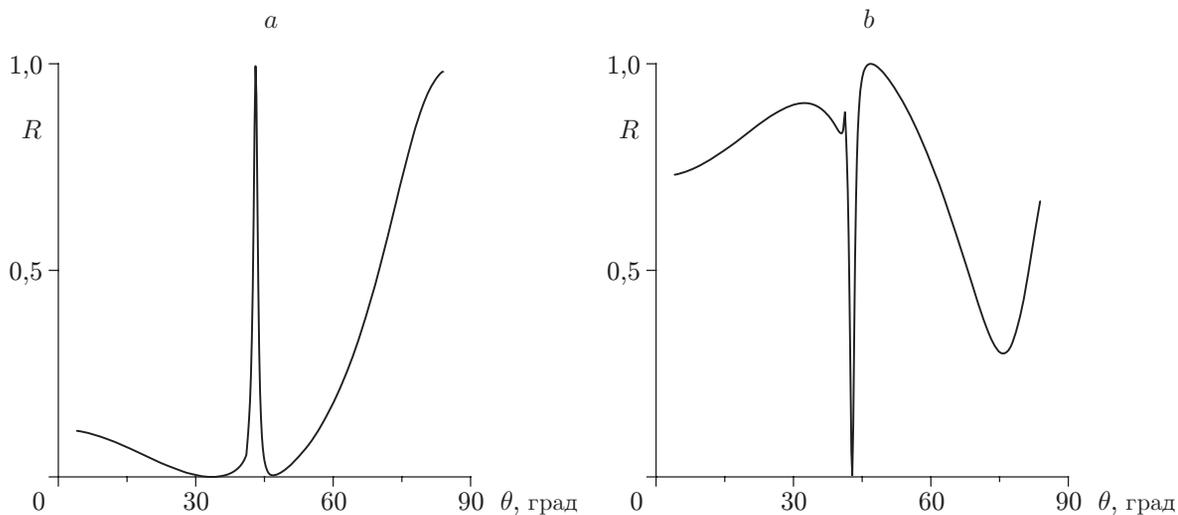


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициента отражения для  $\lambda_0$  при изменении толщины зазора (прилегающего к металлу диэлектрического слоя): металл находится в узле стоячей волны (а); в пучности (б)

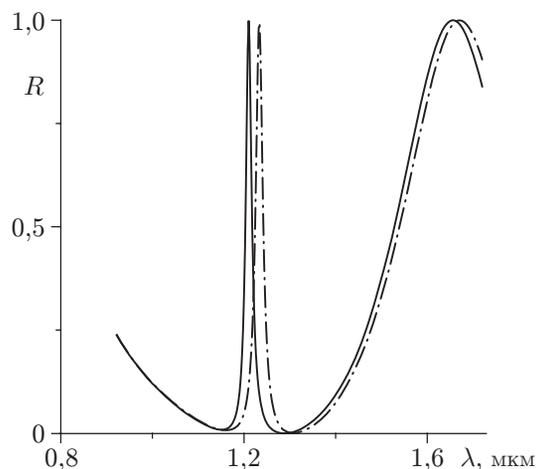


Рис. 4. Спектральное смещение пика на 24 нм при изменении показателя преломления внешней среды с 1,00 до 1,02

и границей ПВО многослойного диэлектрического интерферометра. Структуру ОИ можно записать в следующем виде:  $\text{GMH}_\delta\text{LHLHLH}_\varphi\text{A}$ . Базой диэлектрического интерферометра служит слой  $\text{H}_\varphi$  перед границей ПВО. Изменение толщины  $\varphi$  приводит к смещению кривых по спектру. Толщина прилегающего к металлической плёнке  $\text{H}_\delta$ -слоя («зазор») используется для настройки двух вариантов ОИ. Все остальные слои многослойного покрытия имеют четвертьволновую толщину  $\lambda_0/4$ . Изменением толщины зазора регулируется расположение металлической плёнки в узле или пучности стоячей волны. Тем самым осуществляется метаморфоза экстремума  $R_s$ : при толщине  $\delta = 0,4(\lambda_0/4)$  имеем узкий максимум  $R_s$ , при толщине  $\delta = 1,3(\lambda_0/4)$  — резкий минимум  $R_s$  (рис. 2).

Подобная трансформация экстремума коэффициента отражения  $R_s$  может быть осуществлена и в угловой зависимости. На рис. 3 приведены результаты расчёта для  $\lambda_0 = 1,22$  мкм. Здесь толщины слоёв те же, что и на рис. 2. При  $\delta = 0,4(\lambda_0/4)$  экстремум  $R_s(\theta)$  имеет максимум вблизи угла  $\theta = 44^\circ$ , а при  $\delta = 1,3(\lambda_0/4)$  — минимум.

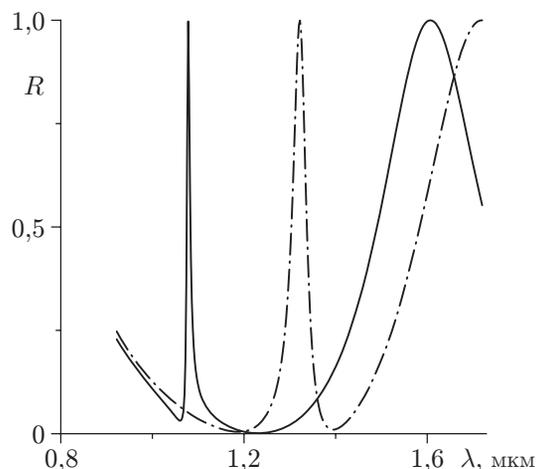


Рис. 5. Смещение пика коэффициента отражения при уменьшении толщины базы (сплошная кривая) и увеличении толщины (штрихпунктирная кривая)

**Обсуждение.** Предлагаемый ОИ для  $S$ -поляризованного света с узким экстремумом  $R_s$  может быть использован как сенсор для анализа изменений показателя преломления внешней среды. На рис. 4 показано спектральное смещение пика на 24 нм при изменении показателя преломления с 1,00 до 1,02. Аналогичные изменения происходят и для системы в виде провалов  $R_s$ .

Трансформация спектральных и угловых зависимостей  $R_s$  может быть произведена, если зазор изготовлен из материала, показатель преломления которого изменяется при каком-либо физическом воздействии (электрического поля, температуры).

Смещение экстремумов при изменении толщины  $H$ -базы в пределах спектрального плато показано на рис. 5. Размеры плато могут быть увеличены добавлением числа диэлектрических слоёв. Уменьшение толщины металлической плёнки также приводит к расширению плато за счёт спада поглощения.

Преобразованные экстремумы (инверты), помимо области плато вблизи  $\lambda_0 = 1,22$  мкм, находятся и в других областях спектра. Так, на рис. 2 они хорошо видны с коротковолновой стороны. Если для  $\lambda_0$  это максимумы  $R_s$ , то для  $\lambda < \lambda_0$  — минимумы  $R_s$ .

Для  $P$ -поляризации эффект также присутствует, но нет резкости для экстремумов  $R_p$ .

**Заключение.** Метаморфоза зависимости коэффициента отражения  $S$ -поляризованного света в новом варианте ОИ, когда металлическая плёнка находится перед многослойным диэлектрическим интерферометром, происходит при изменении толщины одного диэлектрического слоя — зазора. Происходит превращение узких экстремумов  $R_s$  в спектральной или угловой зависимости.

Новый вариант ОИ может быть использован для анализа показателя преломления окружающей среды [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кард П. Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных плёнок. Таллин: Валгус, 1971. 235 с.
2. Li L., Dobrowolski J. A. High performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle // Appl. Opt. 2000. **39**, N 16. P. 2754–2771.

3. **Голдина Н. Д.** Тонкослойные покрытия для лазерной оптики. Новосибирск: Академиздат, 2018. 132 с.
4. **Голдина Н. Д.** Расчёт коэффициента отражения металл-диэлектрических структур при нарушенном полном внутреннем отражении // Автометрия. 2009. **45**, № 6. С. 99–104.
5. **Терентьев В. С., Симонов В. А.** Спектральные характеристики наклонного отражательного интерферометра как сенсора показателя преломления // Оптика и спектроскопия. 2021. **129**, вып. 2. С. 238.

*Поступила в редакцию 24.12.2020*

*После доработки 13.01.2021*

*Принята к публикации 18.01.2021*

---