

УДК 535.243.2

## ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ ДРУДЕ ПРИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ ЗОЛОТЫХ ПЛЕНОК

Л. И. СОТСКАЯ<sup>1</sup>, Е. А. ЧУДАКОВ<sup>2</sup>, А. Б. СОТСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет

<sup>2</sup>Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова  
Могилев, Беларусь

Золотые пленки на диэлектрических и полупроводниковых подложках находят многочисленные применения в микроэлектронике, оптике и медицине. Для ряда приложений необходим прецизионный контроль оптических параметров золотых пленок. Как правило, он осуществляется методами спектрофотометрии, либо эллипсометрии при описании электродинамических свойств металла посредством комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_n(\lambda)$ . В инфракрасном (ИК) диапазоне изменения длины волны  $\lambda$  для  $\epsilon_n(\lambda)$  обычно используется классическая модель Друде. Она предполагает локальную связь между плотностью тока и напряженностью электрического поля в металле. Однако в условиях, когда толщина скин-слоя сопоставима с  $\lambda$ , либо с толщиной пленки  $d$ , данное допущение является проблематичным.

Более корректное описание взаимодействия света с металлом возможно в рамках теории аномального скин-эффекта, подразумевающей совместное решение уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана. Авторами разработан вариант такой теории, сводящий задачу к решению интегральных уравнений Фредгольма второго рода относительно напряженности электрического поля в металле. В ИК-диапазоне модель содержит пять свободных параметров  $d$ , плотность электронного газа  $n$ , время релаксации  $\tau$ , вероятность зеркального отражения электрона от границы раздела «пленка – подложка»  $p_1$  и аналогичную вероятность  $p_2$  для границы раздела «пленка – покровная среда». Разработан алгоритм численного решения уравнений, основанный на методе квадратур. На его основе проведена обработка литературных данных по спектральной эллипсометрии золотых пленок на кремниевой подложке. В результате определены значения  $n = 5,46 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3$ ,  $\tau = 9,16 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ . В работе они использованы для моделирования спектрофотометрического эксперимента. В нем на основании теории аномального скин-эффекта выполнен строгий расчет спектров энергетического коэффициента отражения плоских волн  $R(\lambda)$  при их нормальном падении на структуру «золотая пленка – кварцевая подложка из воздуха» (рис. 1, а). Вычисления выполнены при  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = 0$ ,  $p_2 = 1$ . Найденные спектры  $R(\lambda)$  обработаны по модели Друде с целью определения  $n$ ,  $\tau$  и спектра  $\epsilon_n(\lambda)$  для золота. Результаты представлены на рис. 1, б и в табл. 1.

Согласно представленным данным, использование модели Друде при решении обратной задачи спектрофотометрии золотых пленок имеет недостаток, состоящий в зависимости констант металла от толщины пленки. В частности,

$|\text{Im}\epsilon_n(\lambda)|$  монотонно возрастает при уменьшении  $d$  (см. рис. 1, б). Аналогичная картина отмечалась в ряде экспериментальных работ по спектрофотометрии и эллипсометрии металлических пленок. Модель Друде не учитывает также влияние на измеряемые спектры вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  (см. рис. 1, а). Отмеченные трудности устраняются при решении обратных оптических задач на основании модели аномального скин-эффекта.

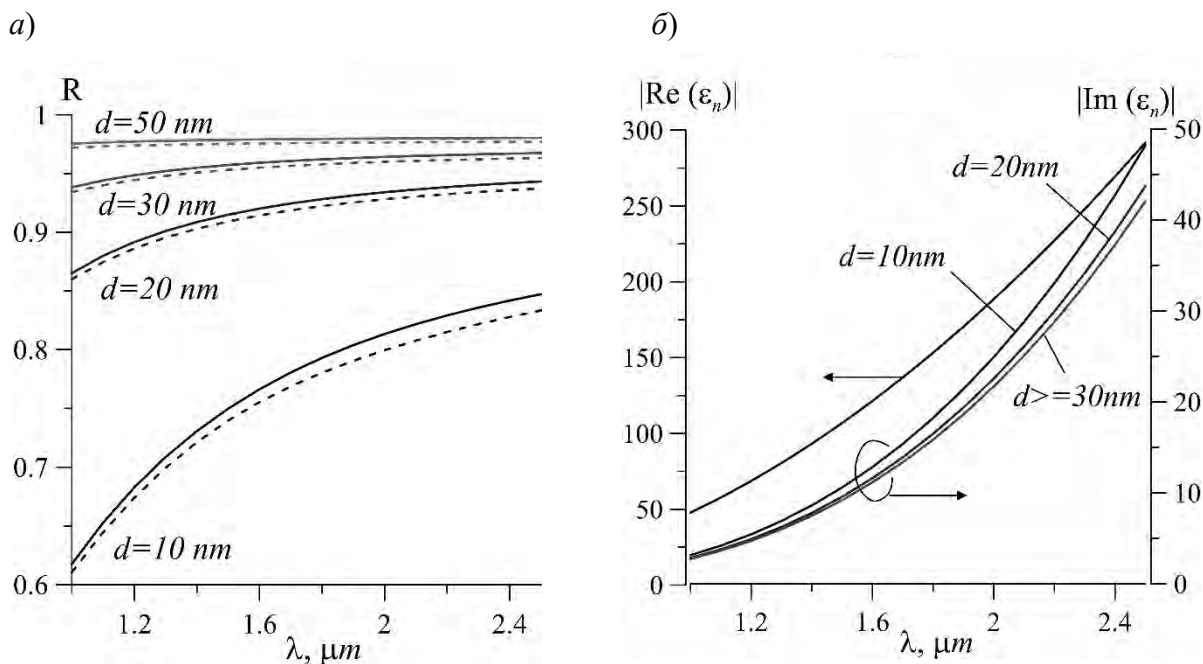


Рис. 1. Результаты вычисления: *a* – спектры отражения  $R(\lambda)$  от золотых пленок различных толщин при  $p_2 = 0$  (штриховые кривые) и  $p_2 = 1$  (сплошные кривые); *б* – восстановление  $\epsilon_n(\lambda)$  по модели Друде при  $p_2 = 1$  (графики  $|\text{Re}\epsilon_n(\lambda)|$ , соответствующие различным  $d$ , визуально совпадают)

Табл. 1. Восстановление  $n$ ,  $\tau$  по модели Друде

$d$ , nm	$p_2$	$n$ , $10^{-28} \cdot 1/\text{m}^3$	$\tau$ , $10^{15} \cdot \text{s}$
10	1	5,34	8,03
	0	5,34	6,51
20	1	5,32	8,85
	0	5,30	7,61
30	1	5,29	9,17
	0	5,27	7,92
50	1	5,29	9,17
	0	5,11	8,08

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».