

УДК 535.243.2

ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ ДРУДЕ ПРИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ ЗОЛОТЫХ ПЛЕНОК

Л. И. СОТСКАЯ¹, Е. А. ЧУДАКОВ², А. Б. СОТСКИЙ²

¹Белорусско-Российский университет

²Могилевский 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 λ 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 λ , 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 τ , 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 , τ 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.

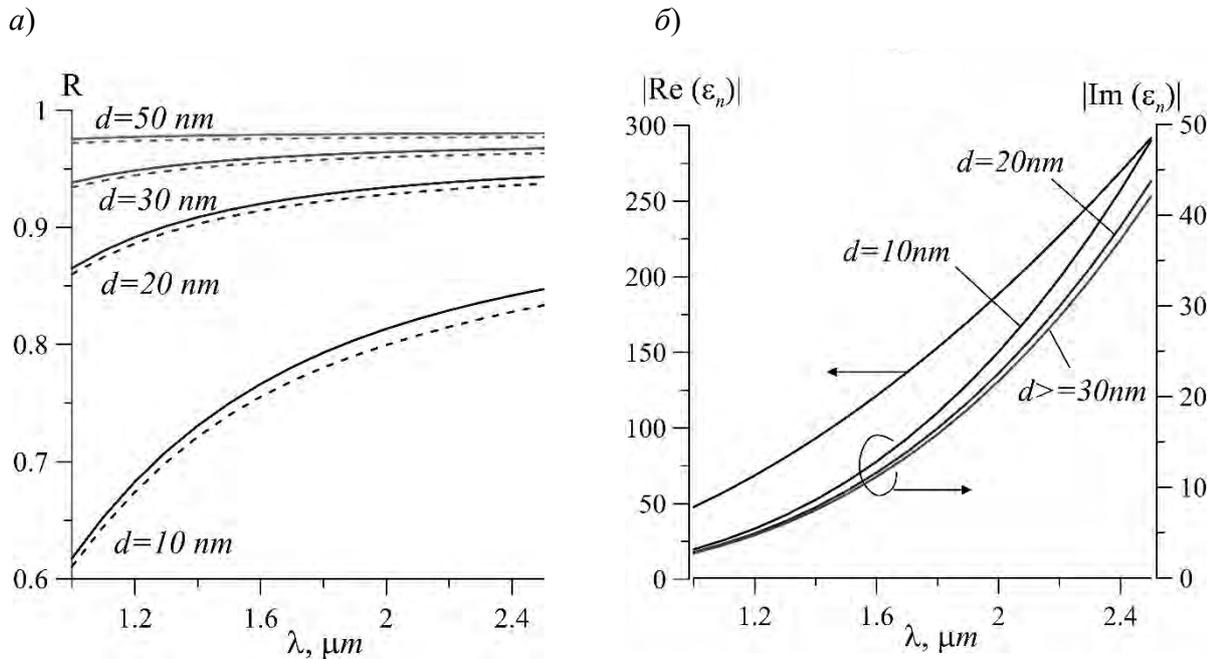


Рис. 1. Результаты вычисления: *a* – спектры отражения $R(\lambda)$ от золотых пленок различных толщин при $p_2 = 0$ (штриховые кривые) и $p_2 = 1$ (сплошные кривые); *б* – восстановление $\epsilon_n(\lambda)$ по модели Друде при $p_2 = 1$ (графики $|\text{Re}\epsilon_n(\lambda)|$, соответствующие различным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

Табл. 1. Восстановление n , τ по модели Друде

d , nm	p_2	n , $10^{-28} \cdot 1/\text{m}^3$	τ , $10^{15} \cdot \text{s}$
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».