

УДК 535.32:621.378

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ

© 2016 г. А. В. Хомченко¹, И. У. Примак¹, А. Б. Сотский², И. А. Корнеева¹,
Н. А. Крекотень³, А. Н. Петлицкий³

E-mail: avkh@mogilev.by

Предложен новый бесконтактный метод контроля параметров наноразмерных металлических покрытий, основанный на обработке измеренной угловой зависимости коэффициента отражения поляризованного лазерного пучка от поверхности тонкопленочной структуры.

DOI: 10.7868/S0367676516040190

Оптический контроль наноразмерных металлических покрытий представляет определенный интерес для микро- и оптоэлектроники. Одним из эффективных методов такого контроля является ПЭВ-спектроскопия, основанная на возбуждении поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) [1]. Благодаря локализации в окрестности поверхности металла ПЭВ крайне чувствительны к состоянию границы раздела, а также к наличию слоев, осажденных на поверхность металлической пленки [1, 2].

Определенные перспективы в области контроля металлических покрытий имеют интегрально-оптические методы, основанные на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка $R(\gamma)$ в схеме призмного возбуждения мод тонкопленочной структуры [3]. В принципе, учет информации о распределении $R(\gamma)$ позволяет определить комплексный показатель преломления и толщину пленок, направляющих ПЭВ, путем решения известных дисперсионных уравнений [1, 4].

Однако при исследовании пленок из алюминия и титана было обнаружено, что погрешности определения их параметров указанным способом становятся неприемлемо высокими, если толщина пленки составляет несколько нанометров [5]. Эту особенность можно объяснить наличием трудно контролируемого переходного слоя между призмой связи и металлической пленкой. В то же время при измерении параметров металлических пленок было замечено, что погрешность измерений уменьшается при увеличении толщины буферного слоя [3], что позволило отказаться от использования призмы связи в установке для волноводной спектроскопии [6] (считая толщину

буферного слоя бесконечно большой), сохранив неизменными остальные ее узлы, и таким образом фактически предложить рефлектометрический метод, основанный на многоугловом измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры. Предложенный метод концептуально близок к подходу, продемонстрированному в работе [7], являясь его развитием.

В настоящей работе предложен метод контроля параметров наноразмерных металлических покрытий и двухслойных структур на кремниевой подложке, основанного на обработке измеренной угловой зависимости коэффициента отражения поляризованного лазерного пучка от тонкопленочной структуры. Ниже обсуждаются результаты и особенности такого подхода.

Принципиальная схема установки для измерения распределения $R(\gamma)$ приведена на рис. 1. В ней лазерный пучок падает на тонкопленочную структуру 7, установленную на поворотном столике 10. Угол падения пучка на образец изменяется с помощью шагового двигателя 15. Зависимость коэффициента отражения лазерного пучка от поверхности тонкопленочной структуры $R(\gamma)$ регистрируется фотоприемником 12, синхронно перемещаемым вторым шаговым двигателем 14, путем измерения мощности светового пучка, отраженного от образца и мощности падающего пучка, которая контролируется фотоприемником 11 (блок управления двигателями 16 синхронизирован с блоком сравнения каналов 17). После цифровой обработки сигнал поступает в оперативную память компьютера. Измерения проводились с использованием лазерного пучка ТМ- или ТЕ-поляризации с длиной волны 633 нм, шаг дискретизации угла γ составлял 20 секунд.

Возможности такого подхода были протестированы на простейшей структуре – алюминиевая пленка на подложке. Параметры металлического слоя: комплексный показатель преломления и

¹ Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь.

² Могилевский государственный университет имени А. Кулешова, Могилев, Беларусь.

³ НТЦ БМС ОАО “Интеграл”, Минск, Беларусь.



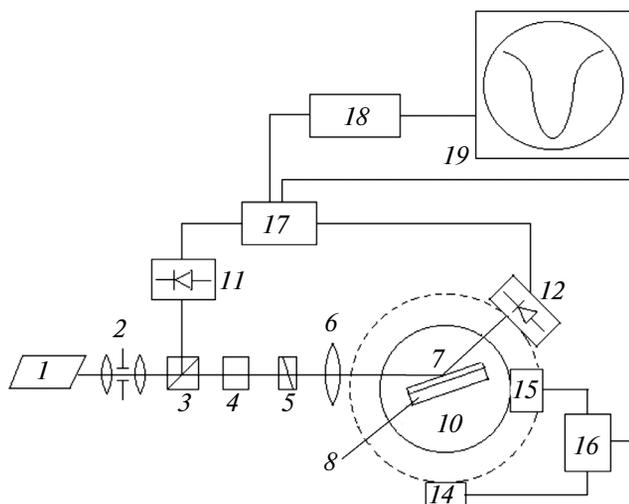


Рис. 1. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка: 1 – источник излучения, 2 – коллиматор, 3 – делитель пучка, 4 – аттенюатор, 5 – поляризатор, 6 – линза, 7 – тонкопленочная структура на подложке, 8, 10 – поворотный столик, 11 и 12 – фотоприемники, 14 и 15 – шаговые двигатели, 16 – блок синхронного управления шаговыми двигателями, 17 – блок сравнения каналов, 18 – аналого-цифровой преобразователь, 19 – персональный компьютер.

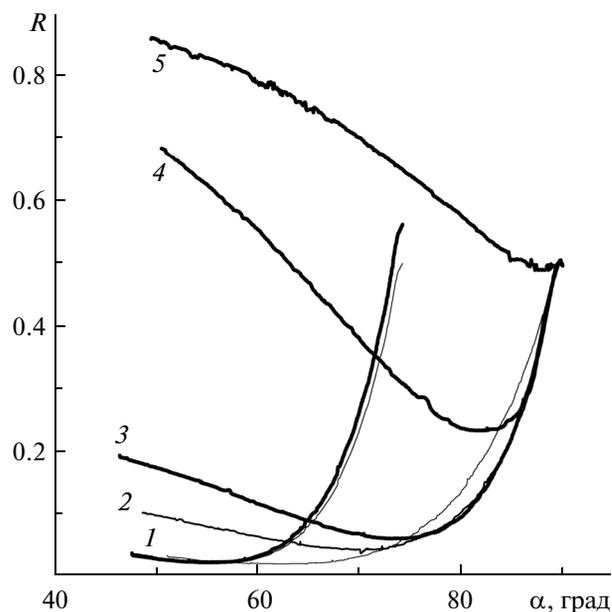


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента отражения лазерного пучка от алюминиевого слоя, напыленного на кварцевую подложку, толщиной 2 нм (кривая 1), 3.5 нм (2), 5 нм (3), 18 нм (4) и 26 нм (5).

его толщину, которая составляла 1–5 нм, определяют путем обработки угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка от поверхности исследуемой структуры. Результаты измерений угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка $R(\gamma)$ представлены на рис. 2.

Как следует из анализа рисунка 2, распределение $R(\gamma)$ имеет высокую чувствительность к толщине наноразмерной металлической пленки. Следует отметить, что химическая модификация пленки также существенно изменяет угловой спектр коэффициента отражения.

Для восстановления параметров пленок путем обработки распределения $R(\gamma)$ использован метод наименьших квадратов. При таком подходе максимизация чувствительности оптического контроля металлических покрытий эквивалентна минимизации погрешности решения обратной оптической задачи.

В данном случае минимизируется целевая функция

$$I = \sum_{j=1}^n [f(x_i, \gamma_j) - R(\gamma_j)]^2, \quad (1)$$

где n – число измерений коэффициента отражения R , $f(x_i, \gamma)$ – теоретическая модель коэффициента отражения, x_i ($x_1 = h$, $x_2 = \text{Re} n_f$, $x_3 = \text{Im} n_f$, h – толщина металлической пленки, n_f – ее показатель преломления) – параметры модели, подлежащие определению; угол падения пучка γ изменяется в диапазоне (a, b) .

Тогда среднеквадратичная погрешность $\sigma(x_k)$ определения параметра x_k может быть оценена из выражения

$$\sigma(x_k) = \sigma(R) J_k \sqrt{(b-a)/n}, \quad (2)$$

где $J_k^2 = \int_a^b \sum_i \left[M_{ki}^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \right]^2 d\gamma$,

$$M_{ki} = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_k} d\gamma,$$

$\sigma(R)$ – среднеквадратичное отклонение R .

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента J_1 , определяющего погрешность восстановления параметра x_i , от толщины пленки.

Расчеты выполнены при $a = 0$, $b = \pi/2$ на длине волны 633 нм для пленки титана, расположенной на кремниевой подложке. Как следует из анализа представленных на рисунке данных для проведения подобных измерений, предпочтительнее использовать свет ТМ-поляризации. В этом случае функция $J_1(h)$ достигает минимума и остается практически постоянной при толщине пленки до $h = 20$ нм. Значительный рост погрешности измерений в диапазоне $h > 20$ нм объясняется тем, что

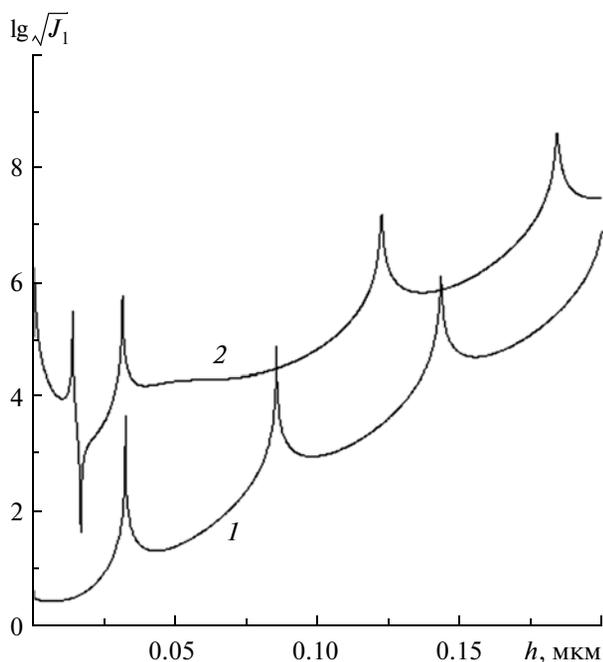


Рис. 3. Зависимость коэффициента J_1 от толщины пленки при определении ее параметров на основе обработки угловых зависимостей коэффициента отражения для волн ТМ- (1) и ТЕ-поляризации (2).

более толстая металлическая пленка становится непрозрачной.

В целях анализа возможностей метода рефлектометрии металлических пленок на кремниевой подложке был выполнен ряд вычислительных экспериментов. Рассматривалось отражение света (длина волны 633 нм) от поверхности структур типа Al–Si, Ti–Si, Al–SiO₂–Si, Ti–SiO₂–Si. При этом зондирующее излучение имеет ТМ-поляризацию. Следует отметить, что, согласно нашим

оценкам и результатам работы [7], в этом случае достигается наибольшая чувствительность к определяемым параметрам. Диапазон углов падения изменялся в пределах от 8° до 88°, количество шагов по углу $n = 200$. Экспериментальные данные моделировались добавлением к рассчитанной зависимости $R(\gamma)$ погрешностей, имеющих нормальный закон распределения с задаваемым среднеквадратическим отклонением σ (в данном случае $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$). Результаты решения обратной задачи путем минимизации функционала (1) для структур при различной толщине алюминиевой пленки представлены в таблице.

Анализ результатов свидетельствует о том, что определение параметров алюминиевой пленки может быть выполнено с погрешностью, не превышающей 15%, в диапазоне толщин от 0.02 до 0.03 мкм, а титановой пленки – в диапазоне толщин 0.01–0.03 мкм. Значение верхней границы данного диапазона обусловлено малой глубиной проникновения в металл излучения: для алюминия она составляет ~0.014 мкм, для титана – ~0.027 мкм. Большое значение определяемой минимальной толщины пленки в указанном диапазоне обусловлено существенным влиянием на отражение света поглощающей кремниевой подложки.

При толщинах металлической пленки менее 0.01 мкм рассматриваемая методика менее чувствительна к параметрам пленки, однако существенное влияние оказывает кремниевая подложка. Наличие буферного слоя между кремнием и металлом позволяет расширить границы определения параметров металлической пленки. Согласно оценкам, параметры алюминиевой пленки в структуре Al–SiO₂–Si можно осуществить с погрешностью, не превышающей 15%, в диапазоне толщин от 5 до 50 нм, а титановой пленки – от 5 до 60 нм.

Параметры алюминиевого слоя на кремниевой подложке

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости $\epsilon_m = \epsilon'_m + i\epsilon''_m$ и толщина слоя h , мкм	Значения параметров, определенные по угловой зависимости коэффициента отражения, $\epsilon_m = \epsilon'_m + i\epsilon''_m$ h , мкм
47.56 + i 16.8 0.005	68.07 + i 17.29 0.038
47.56 + i 16.8 0.01	37.8 + i 19.25 0.0125
47.56 + i 16.8 0.02	45.96 + i 18.34 0.021
47.56 + i 16.8 0.03	47.15 + i 17.97 0.034
47.56 + i 16.8 0.04	47.55 + i 17.4 0.09



Таким образом, как следует из представленных данных, описанный метод оптического контроля параметров наноразмерных металлических покрытий, основанный на обработке измеренной угловой зависимости коэффициента отражения поляризованного лазерного пучка от поверхности тонкопленочной структуры и гораздо более простой в реализации, обеспечивает точность результатов, сопоставимую с данными эллипсометрии и интерферометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.К., Логинов А.П., Головцов Н.И. // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90. № 6. С. 965.
2. *Khomchenko A.V.* Waveguide spectroscopy of thin films. N. Y.: Acad. Press, 2005.
3. *Сотский А.Б., Steingart L.M., Jackson J.H. и др.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 11. С. 105.
4. *Абаев М.И., Пустотина С.Р.* // Автометрия. 1997. № 1. С. 119.
5. *Kangarlou H., Aghgonbad M.M.* // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 5. С. 844.
6. *Хомченко А.В., Сотский А.Б. и др.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 6. С. 98.
7. *Биленко Д.И., Сагайдачный А.А., Галушка В.В., Полянская В.П.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 89.

