

Цифровой метод измерения толщины нанометровых пленок на базе микроинтерферометра МИИ-4

А. Ю. Мешалкин^а, И. С. Андриеш^б, В. Г. Абашкин^а,
А. М. Присакар^а, Г. М. Тридух^а, Е. А. Акимова^а, М. А. Енаки^с

^аИнститут прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: alexei@asm.md

^бГосударственный университет Молдовы,
ул. А. Матеевича, 60, г. Кишинев, MD-2009, Республика Молдова

^сНациональный центр исследования и тестирования материалов,
Технический университет Молдовы,

бул. Штефана чел Маре, 168, г. Кишинев, MD-2004, Республика Молдова

Используя цифровую обработку результатов измерений, расширены измерительные возможности микроинтерферометра МИИ-4 на область нанометровой толщины пленок. Модернизированный микроинтерферометр с адаптированной веб-камерой для регистрации интерференционных картин, а также разработанное программное обеспечение Optic Meter позволяют не только определять толщину нанометрового диапазона, но и существенно уменьшить при этом погрешность измерений. Цифровая обработка интерферограмм с помощью программного обеспечения Optic Meter дает возможность измерять толщину до 20 нм с разрешающей способностью 5 нм, чего практически нельзя достичь, применяя визуальный метод измерения. Сравнение результатов, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии и модернизированного интерферометра, показало различие в значениях в 2 нм, что подтверждает правомерность предлагаемого метода.

УДК 621.372.542

ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства тонких пленок представляют интерес благодаря тому, что в этих объектах реализуются размерные эффекты, не наблюдаемые в массивных образцах. Особую роль играют тонкопленочные покрытия в оптике, где свойства создаваемых структур во многом определяются толщиной пленки [1]. С развитием исследований в области тонких пленок актуальным становится измерение толщины нанометровых пленок. Среди существующих методов измерения малой толщины, таких как эллипсометрический, атомно-силовой микроскопии [2], профилометрический и интерферометрический [3], широко используется интерферометрический метод, например в распространенном микроскопе-микроинтерферометре МИИ-4. Он представляет собой видоизмененный интерферометр Майкельсона с микрообъективом и предназначен для визуальной оценки и измерения толщины пленок и глубины микрорельефа. Простой в эксплуатации, такой интерферометр позволяет обнаружить неровности порядка долей длины волны на исследуемой поверхности. Однако визуальный метод измерений становится малоэффективным при малозаметных на интерферограмме смещениях интерференционных полос, которые соответствуют толщинам меньшим 20–30 нм, что обусловлено субъективностью и трудоемкостью определения оператором точного положения интерференционной полосы конечной толщины и её смещения в условиях дрейфа самой картины. Более точным является фотометрический анализ интерферограммы в цифровом виде [4]. Таким образом, цель настоящей работы – создание методики определения толщины пленки с нанометровым разрешением с помощью компьютерной обработки снимка интерферограммы, полученной на МИИ-4.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения толщины и микрорельефа использовался модифицированный микроинтерферометр МИИ-4, принцип действия которого основан на эффекте двухлучевой интерференции в отраженном свете (рис. 1).

Для измерения толщины пленки, нанесенной на плоскую полированную подложку, необходимо, чтобы часть последней была свободной от пленки, образуя четкую ступеньку. Это достигается экранированием участка подложки при нанесении пленки, стравливанием или механичес-

ким удалением ее части. Наличие ступеньки в толщине пленки приводит к смещению интерференционных полос на интерферограмме (рис. 2). Толщина непрозрачной пленки определяется по формуле

$$h = \frac{\lambda \cdot c}{2 \cdot b}, \quad (1)$$

где λ – длина волны используемого света; c – смещение ахроматической полосы на ступеньке; b – расстояние между полосами.

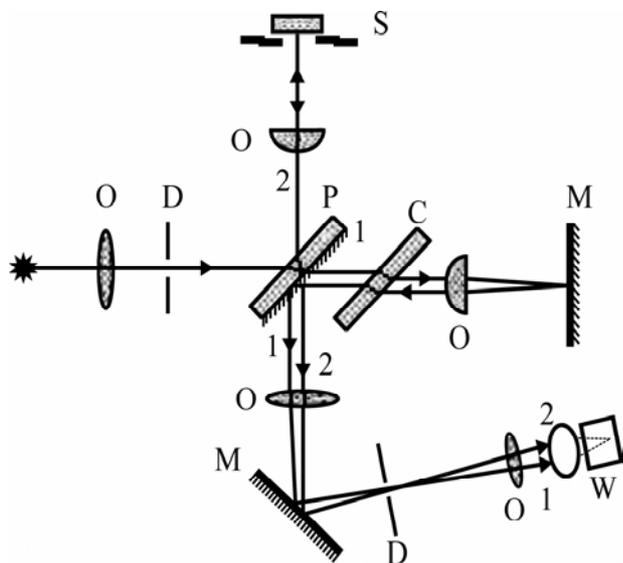


Рис. 1. Оптическая схема микроинтерферометра МИИ-4 с установленной веб-камерой. 1 – опорный луч; 2 – предметный луч; *O* – линзы; *D* – диафрагмы; *M* – зеркала; *P* – светоделительная пластинка; *C* – компенсирующая пластинка; *S* – образец; *W* – веб-камера.

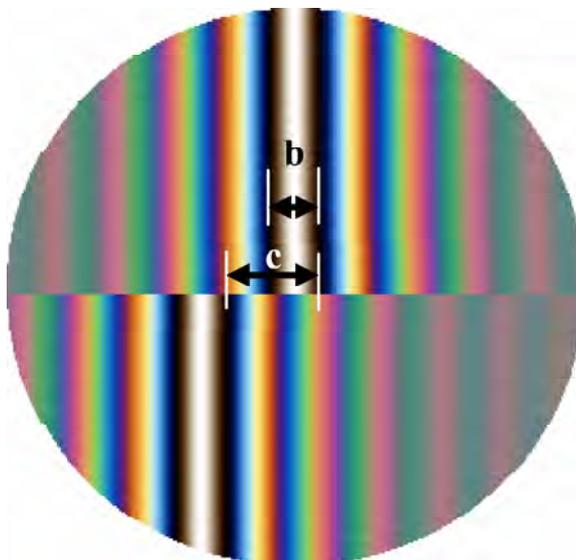


Рис. 2. Смещение на величину c ахроматической полосы на интерферограмме в белом свете на ступеньке в толщине h .

Модернизация микроинтерферометра МИИ-4 состояла в установке цветной цифровой веб-камеры Logitech HD Webcam C310 1280x720pxs с помощью адаптера (рис. 3). Это позволило существенно упростить процесс измерения толщины и обрабатывать изображение интерференционной картины на ПК. Для более точной оценки измеряемых толщин по сохраненным интерферограммам было разработано программное обеспечение Optic Meter, позволяющее представить интерференционную картину в аналитической форме и точно рассчитать величины b и c . Методы разработанного программного обеспечения основаны на построении математической модели интерферограмм и определении линий максимумов и минимумов в интерферограмме методом наименьших квадратов.

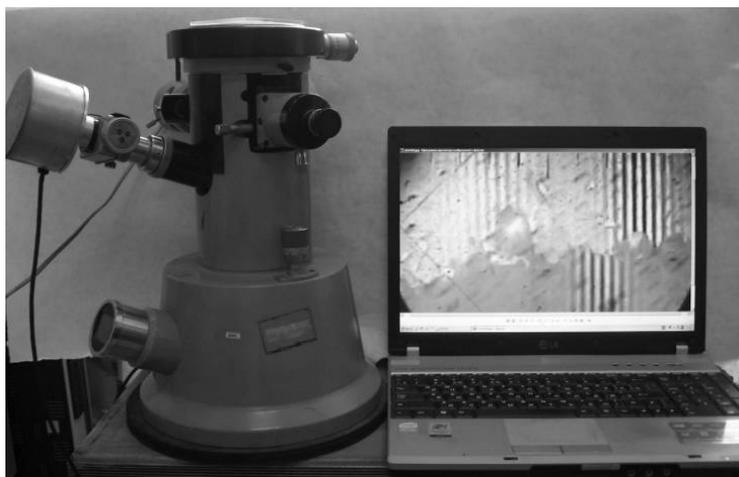


Рис. 3. Микроинтерферометр МИИ-4 с веб-камерой и интерференционная картина на экране монитора.

Для того чтобы с высокой точностью определить параметры b и c , необходимо с соответствующей точностью построить линии экстремумов для центральных несмещенных и смещенных полос интерферограммы. Для этого определяются множества экстремальных точек заданного типа (min

или \max), содержащихся в выбираемых интерактивным образом трех прямоугольных областях – N_1 , N_2 и N_3 (рис. 4,б). Важно, что каждым прямоугольником ограничиваются только точки одного, заранее выбранного для данного акта измерения экстремального типа (областей минимумов на рис. 4). Прямоугольники располагаются в областях с наилучшим качеством изображения центральных полос. Для улучшения качества изображения предусматриваются методы предобработки, прежде всего сглаживания и фильтрации.

В простейшем случае, когда интерференционные полосы строго параллельны границам кадра (то есть границам матрицы пикселей), линии экстремальных точек должны быть параллельны вертикальным границам кадра (рис. 4,в). В этом приближении по полученному множеству экстремальных точек (по одной в каждой строке i) можно провести усреднение значений координаты j уже по всем строкам. Таким образом, определяются координаты J_1 , J_2 и J_3 линий, представляющих усредненные положения множеств этих экстремумов для прямоугольников N_1 , N_2 и N_3 соответственно.

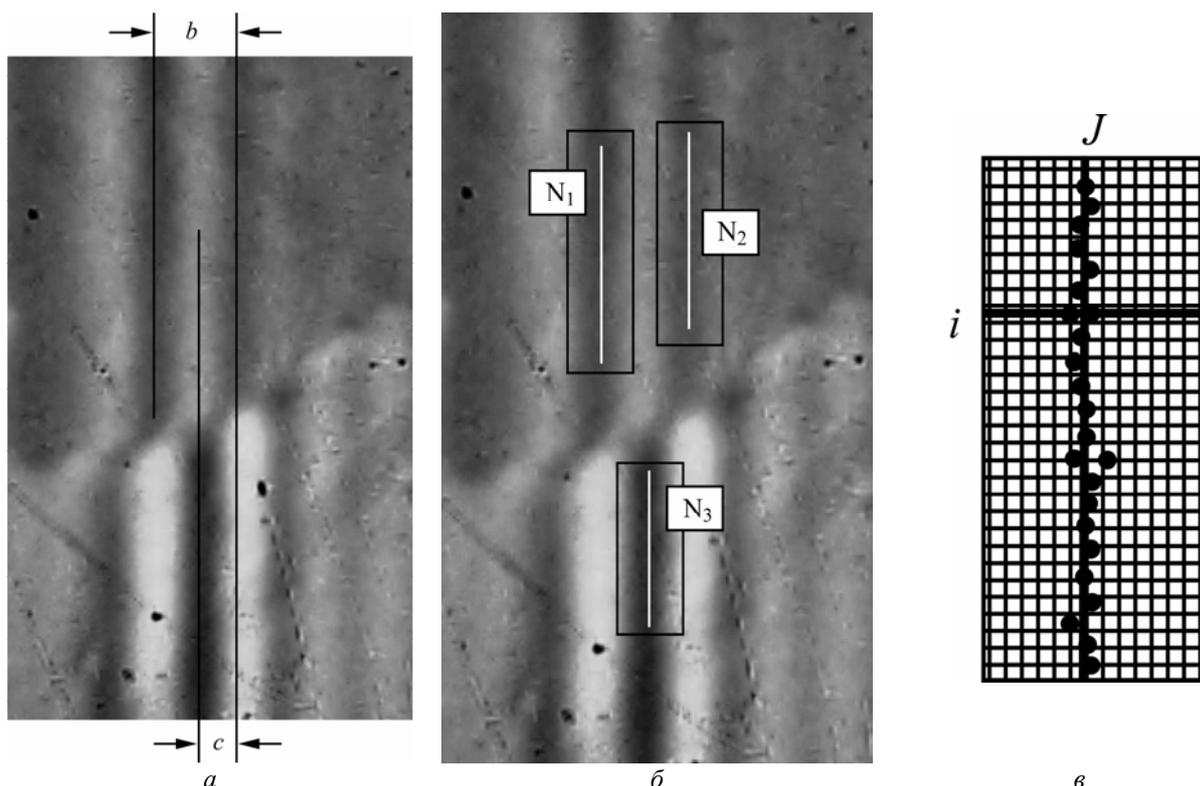


Рис. 4. Пример интерферограммы. а) значения b и c согласно формуле (1); б) интерактивный выбор областей N_1 , N_2 и N_3 ; в) определение ординаты J линии экстремальных точек в областях N_i .

Прямоугольники N_1 и N_2 позиционируются таким образом, чтобы они накрывали соседние множества экстремальных точек одного типа и позволяли определить расстояние между интерференционными полосами b как разность по модулю ординат линий $|J_1 - J_2|$. Прямоугольник N_3 позиционируется таким образом, чтобы он накрывал смещенное по отношению к множеству N_2 множество экстремальных точек N_3 , так что разность по модулю $|J_3 - J_2|$ определяет смещение ахроматической полосы c . Искомая толщина h , таким образом, определяется по формуле

$$h = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{c}{b} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{|J_3 - J_2|}{|J_1 - J_2|} \quad (2)$$

Для верификации этого метода и оценки достоверности измеряемых величин толщины был изготовлен калибровочный образец. На стеклянную полированную подложку наносился тонкий слой алюминия методом термического испарения в вакууме с экранированием части подложки для образования ступеньки.

Толщину определили с помощью модернизированного МИИ-4 с программной обработкой интерферограммы (рис. 5), а также сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) NanoStation II как калибровочного метода (рис. 6).

Расчет с помощью разработанного программного обеспечения показал, что среднестатистическая толщина ступеньки тонкой пленки алюминия, измеренная на МИИ-4, составляет $(15 \pm 5 \text{ нм})$, а

измерения на АСМ дали значение (14 ± 4 нм). При измерении толщины нанометровых проводящих пленок необходимо учитывать изменение фазы отраженного луча из-за комплексного показателя преломления металлов.

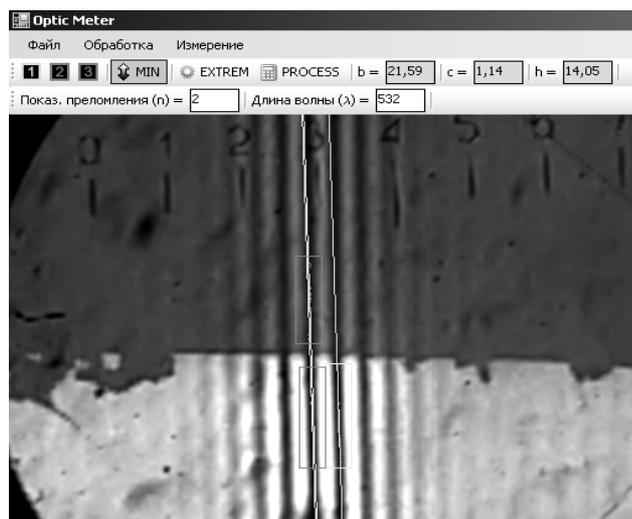


Рис. 5. Интерфейс программы Optic Meter с интерферограммой.

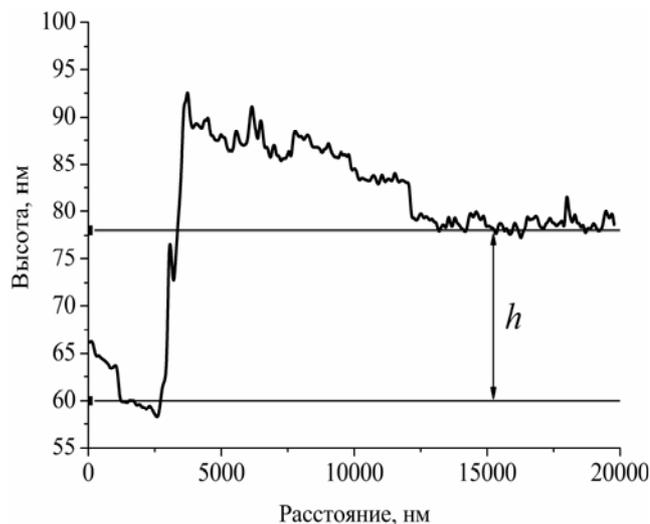


Рис. 6. Профилограмма ступеньки тонкой пленки алюминия, полученная на АСМ. Кромка ступеньки обусловлена процессом напыления через экран.

ВЫВОДЫ

Показана возможность измерения нанометровой толщины пленок с помощью микроинтерферометра МИИ-4 за счет модернизации и компьютеризации процесса. Разработанная программа Optic Meter позволяет существенно уменьшить погрешность измерения толщины, особенно в области нанометровой толщины.

Фотометрический анализ снимков интерферограммы с помощью разработанного программного обеспечения Optic Meter дает возможность измерять толщины до 20 нм с разрешающей способностью 5 нм, чего практически нельзя достичь, используя визуальный метод из-за субъективности и трудоемкости определения оператором точного положения интерференционной полосы конечной толщины и её смещения в условиях дрейфа самой картины. Сравнение результатов измерения толщины предлагаемым методом показало хорошую корреляцию с результатами, полученными на АСМ. Расхождение величин измеренной толщины двух методов находится в рамках погрешности методов.

По сравнению с традиционными устройствами для измерения толщины, такими как профилометры и АСМ, этот метод является более быстрым, бесконтактным и не требует специальной подготовки образца. Комбинированная система микроинтерферометра с веб-камерой позволяет достаточно точно оценивать толщину пленки, наблюдать на мониторе и запоминать топографию поверхности пленки в ПК. Все это делает метод удобным и перспективным в области исследований тонкопленочных покрытий.

Работа была проведена в Институте прикладной физики АНМ в рамках проекта 11.836.05.04А Академии наук Молдовы. Программное обеспечение Optic Meter создано в Государственном университете Молдовы в рамках институционального проекта 11.817.08.49А. Измерение толщины с помощью АСМ было выполнено в Национальном центре по материалам исследования и испытания Технического университета Молдовы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Oloomi S.A.A., Sabounchi A., Sedaghat A. Parametric Study of Nanoscale Radiative Properties of thin Film Coatings. *Nano Trends: J. Nanotechnol. Appl.* 2009, **7**(3), 1–7.
2. Ohmi T., Aoyama S. Calibration of Height in Atomic Force Microscope Images with Subnanometer Scale Silicon Dioxide Steps. *Appl. Phys. Lett.* 1992, **61**, 2479–2481.
3. Conroy M. Advances in thick and thin Film Analysis Using Interferometry. *Wear.* 2009, **266**(5–6), 502–506.
4. Poroshin V., Bogomolov D., Kostyuk A. PC Based Measurement System for Interferometric Analysis of Etalon Roughness. *Advanced Engineering.* 2010, **4**(1), 65–68.

Поступила 29.05.12

Summary

Measuring potential of microinterferometer MII-4 has been spread on the nanometer thickness region by application of digital data processing. The upgraded microinterferometer with an adapted web camera for interference pattern registration as well as the developed software *Optic Meter* make it possible not only to measure the nanometer thickness, but also to significantly reduce the error of thickness measurements. Application of the digital interferogram processing using the developed software *Optic Meter* allows for the measurement of thickness up to 20 nm with a resolution of 5 nm, which is practically impossible to achieve by using the visual method. Comparison of the results of thickness measurements by atomic force microscopy and with the upgraded microinterferometer showed a difference of 2 nm, which proves the reliability of the proposed method.
