

12

Разработка метода расчета фактора корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия по данным атомно-силовой микроскопии

© Ю.В. Грищенко, М.Л. Занавескин, А.Н. Марченков

Национальный исследовательский центр
„Курчатовский институт“, НБИК-Центр, Москва
E-mail: grishchenko.jv@gmail.com

Поступило в Редакцию 28 марта 2012 г.

Представлена методика, позволяющая по данным атомно-силовой микроскопии проводить расчет фактора корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия, который является функцией пространственной частоты и характеризует степень согласованности рельефов. Изучено влияние артефактов атомно-силовой микроскопии на рассчитываемый фактор корреляции и определен диапазон достоверных пространственных частот. Рассчитан фактор корреляции многослойного зеркального покрытия и подложки.

Свойства пленочных покрытий определяют рабочие характеристики широкого круга современных высокотехнологичных устройств. На качество покрытий влияют различные свойства исходной подложки, такие как химический состав, кристаллическая структура, а также рельеф поверхности. Так, например, от величины шероховатости поверхностей подложки и пленочного покрытия зависит степень рассеяния излучения многослойными интерференционными зеркалами [1,2]. Однако в работе [3] показано, что при одних и тех же значениях шероховатости рельефов подложки и пленочного покрытия в случае коррелированного

и некоррелированного рельефов рассеяние может различаться на порядок. При этом вопрос корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия, а также межфазных границ в случае многослойной системы в настоящее время остается слабо изученным из-за малой развитости методов ее диагностирования. Метод изучения *in situ* измерения рентгеновского рассеяния с использованием синхротронного излучения [4] не получил широкого распространения, так как не является общедоступным и имеет возможность исследования пленочных покрытий толщиной до 500 Å, что ограничивает круг изучаемых объектов зеркалами X-ray и EUV-диапазонов.

В этой связи в работе предложен метод изучения корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия с использованием лабораторного атомно-силового микроскопа (АСМ). Апробация метода осуществлялась на многослойных покрытиях ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$), сформированных на подложках из ситалла, которые применяются в кольцевых лазерных гироскопах (КЛГ), работающих на излучении с длиной волны 632.8 nm.

Для количественного определения степени коррелированности рельефов подложки и пленочного покрытия в работе [4] предложено использовать понятие фактора корреляции, который является функцией пространственной частоты и принимает значения от нуля до единицы:

$$K(\nu) = \frac{PSD_{sf}(\nu)}{\sqrt{PSD_s(\nu)PSD_f(\nu)}}, \quad (1)$$

где PSD_s — функция спектральной плотности мощности рельефа подложки, PSD_f — функция PSD рельефа пленочного покрытия, а PSD_{sf} — функция кросс- PSD рельефов подложки и пленочного покрытия, ν — пространственная частота, которая обратно пропорциональна линейному размеру в прямом пространстве $\nu = 1/L$.

Измерение рельефа поверхности подложки, а затем и поверхности пленки (после ее нанесения) с помощью АСМ дает возможность рассчитать функции PSD подложки PSD_s и пленки PSD_f . Однако расчет функции кросс- PSD рельефов подложки и пленочного покрытия представляет проблему, так как требует общей системы координат функций рельефа подложки и пленки, т.е. необходимо измерение их рельефов строго в одной и той же области поверхности.

Рассмотрим алгоритм расчета функции спектральной плотности мощности по данным атомно-силовой микроскопии. По экспериментально полученной двумерной функции высот рельефа поверхности $z(\boldsymbol{\rho})$ рассчитывается автокорреляционная функция:

$$C(\boldsymbol{\rho}) = \langle z(\boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\rho}')z(\boldsymbol{\rho}') \rangle, \quad \boldsymbol{\rho} \equiv (x, y). \quad (2)$$

Применив к автокорреляционной функции двумерное фурье-преобразование, получают двумерную функцию PSD :

$$PSD(\mathbf{v}) = \int \exp(2\pi i \mathbf{v} \boldsymbol{\rho}) C(\boldsymbol{\rho}) d^2 \boldsymbol{\rho}. \quad (3)$$

Таким образом, по известной функции рельефа поверхности подложки $z_s(\boldsymbol{\rho})$, используя формулы (2) и (3), рассчитывается функция PSD_s , а также, зная функцию рельефа поверхности пленочного покрытия $z_f(\boldsymbol{\rho})$, определяется PSD_f . Расчет функции кросс- PSD рельефов подложки и пленки PSD_{sf} возможен только в случае, когда их функции рельефов поверхностей известны в одной области поверхности. Если условие совмещения выполнено, то сначала осуществляется расчет кросс-корреляционной функции (4), а затем и функции PSD_{sf} (5):

$$C_{sf}(\boldsymbol{\rho}) = \langle z_s(\boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\rho}')z_f(\boldsymbol{\rho}') \rangle, \quad (4)$$

$$PSD_{sf}(\mathbf{v}) = \int \exp(2\pi i \mathbf{v} \boldsymbol{\rho}) C_{sf}(\boldsymbol{\rho}) d^2 \boldsymbol{\rho}. \quad (5)$$

Для решения данной задачи совмещения в работе была разработана методика позиционирования, которая состояла из двух этапов: механического позиционирования с помощью сформированной системы микрометок и точного цифрового совмещения полученных АСМ-изображений с использованием разработанного пакета программного обеспечения.

С помощью оптической микроскопии и системы меток определялась ориентация подложки и осуществлялось позиционирование ее по углу. Далее были получены серии АСМ-изображений поверхности, чтобы получить информацию о рельефе во всем спектре пространственных частот, доступном атомно-силовому микроскопу. После нанесения пленочного покрытия было проведено повторное позиционирование образца и удалось получить АСМ-изображения ситалловой подложки со степенью рассогласования в плоскости XY не более 10% от размера области сканирования и угловым несоответствием 2–3°.

Дальнейшее точное совмещение АСМ-изображений осуществлялось с помощью цифровой обработки с применением разработанного пакета программного обеспечения, алгоритм которого основан на поиске максимума кросскорреляционной функции АСМ-изображений (4), которое определяет линейное и угловое смещение изображений относительно друг друга, а затем „вырезает“ общую область совмещаемых АСМ-изображений.

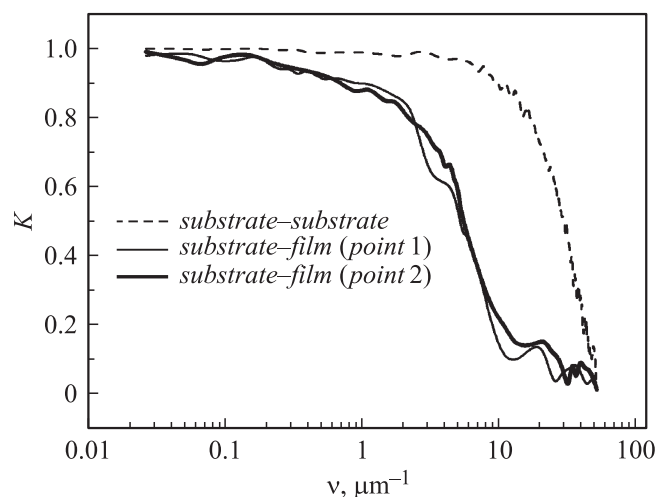
Известно, что во время АСМ-измерений огромное число как внешних, так и внутренних факторов влияют на достоверность получаемых данных. Поэтому на первом этапе работы была проведена проверка стабильности получения экспериментальных результатов.

Влияние внешних факторов, таких как термический дрейф рабочих элементов прибора, вибрационных и акустических шумов, было минимизировано с помощью систем активной и пассивной виброзащит и расположения прибора в термостабильном помещении с температурой 21°C и ее изменением не более $0,5^{\circ}\text{C}$ в час.

Для определения степени влияния шумов, присущих самому микроскопу, были получены серии АСМ-изображений топографии поверхности подложки в одной и той же области и рассчитаны зависимости фактора корреляции от пространственной частоты. Известно, что корреляция рельефов должна быть стопроцентной, т.е. значение фактора корреляции равно единице. На рисунке (пунктирная кривая) видно, что ошибка эксперимента не превышает 10% до пространственной частоты $10\ \mu\text{m}^{-1}$.

Таким образом, если проводить АСМ-эксперимент в помещении со стабильными параметрами окружающей среды, с высокой степенью защиты от акустических и виброшумов, то получаемые данные имеют высокую степень достоверности в диапазоне пространственных частот $0,03-10\ \mu\text{m}^{-1}$.

Эксперимент и дальнейший расчет зависимости фактора корреляции рельефов подложки и многослойного интерференционного зеркала, используемого в КЛГ, от пространственной частоты проводился в двух точках образца (см. рисунок). Резкий спад графиков функций происходит внутри установленного диапазона пространственных частот, а также наблюдается их хорошее совпадение, что еще раз подтверждает достоверность и стабильность экспериментальных результатов, а соответственно и применимость методики изучения корреляции методом АСМ.



Зависимости фактора корреляции рельефов от пространственной частоты одной и той же области поверхности подложки (пунктирная кривая) и подложки и пленочного покрытия для двух точек образца (сплошные кривые).

Резкий спад графика функций фактора корреляции, а значит и потеря согласованности рельефов подложки и пленочного покрытия, происходит при значении пространственной частоты, равной $2 \mu\text{m}^{-1}$. Это означает, что элементы рельефа подложки, размеры которых менее 500 nm, не полностью повторяются в рельефе пленочного покрытия.

Для улучшения рабочих параметров КЛГ необходимо уменьшить рассеяние, которое происходит в направлении падающего пучка, что соответствует пространственной частоте $2.2 \mu\text{m}^{-1}$. Из графиков функций факторов корреляции рельефов подложки и зеркального покрытия (см. рисунок) видно, что данная частота находится на границе резкого спада. Таким образом, данный метод нанесения или параметры ростового процесса не являются оптимальными для изготовления интерференционных зеркальных элементов, а значит существует возможность улучшения рабочих характеристик за счет изменения степени коррелированности рельефов подложки и пленочного покрытия на данной пространственной частоте.

В работе впервые представлена методика, позволяющая рассчитывать фактор корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия

по данным атомно-силовой микроскопии, изучена ее достоверность и устойчивость к артефактам АСМ. Предложенный метод не требует дополнительных технических изменений прибора, а осуществляется с помощью лабораторного АСМ. Кроме определения фактора корреляции в широком диапазоне пространственных частот, данная методика позволяет визуально наблюдать эволюцию рельефа пленочного покрытия, связанную с его ростом, что может быть использовано при изучении основных закономерностей и моделировании ростовых процессов, а также в отличие от метода рентгеновского рассеяния данная методика не имеет ограничений, связанных с толщиной пленочного покрытия.

С помощью представленной методики изучена корреляция рельефов ситалловой подложки и многослойного интерференционного покрытия. Установлено, что элементы рельефа подложки, геометрические размеры которых меньше 500 nm, не полностью переходят в рельеф зеркального покрытия. При этом частота, отвечающая за рассеяние излучения в направлении падающего пучка ($2.2 \mu\text{m}^{-1}$), находится в области спада корреляции, что указывает на возможность оптимизации технологии создания зеркальных элементов и улучшения рабочих характеристик КЛГ.

Работа выполнена в рамках ГК № 16.513.11.3062 и 16.513.11.3104 по ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России“ 2007–2013 гг.

Список литературы

- [1] *Cho H.J., Shin M.J., Lee J.C.* // Appl. Opt. 2006. V. 45. I. 7. P. 1440–1446.
- [2] *Valkovskiy G.A., Baidakova M.V., Brunkov P.N., Konnikov S.G., Yagovkina M.A., Zadiranov Ju.M.* // Phys. Status Solidi. A. 2011. V. 208. I. 11. P. 2623–2628.
- [3] *Kozhevnikov I.V.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section. A. 2003. V. 498. P. 482–495.
- [4] *Peverini L., Ziegler E., Bigault T., Kozhevnikov I.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 045445-(1–6).