

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ, РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

М. Л. Занавескин^{*)}, И. С. Занавескина, Б. С. Роцин^{*)}, В. Е. Асадчиков^{*)},
В. В. Азарова^{**)}, Ю. В. Грищенко^{*)}, А. Л. Толстихина^{*)}

(кафедра физики наносистем)

Проведено исследование шероховатости поверхности полированных ситаловых и кварцевых подложек с помощью методов атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света. Для различных подложек показано хорошее совпадение функций спектральной плотности мощности рельефа поверхности и значений эффективной высоты шероховатости, рассчитанных по данным трех методов.

Введение

Для решения ряда современных научных и технологических задач требуются конструктивные элементы с весьма гладкими поверхностями. Возможности создаваемых на их базе устройств определяются качеством полировки поверхностей. Это определяет потребность в достоверных и сопоставимых методиках измерения шероховатости сверхгладких поверхностей, т. е. поверхностей с высотой шероховатости менее 1 нм. Эта задача тем более актуальна, поскольку в настоящее время не разработаны безоговорочно принятые методики определения столь малых значений шероховатости. В этой связи в настоящей работе использовались и сопоставлялись различные по физической сути методики исследования шероховатости поверхности: атомно-силовая микроскопия (АСМ), рентгеновское рассеяние (РР) и дифференциальное рассеяние света (ДРС). По экспериментальным данным, полученным этими методами, рассчитывались функции спектральной плотности мощности (СПМ) шероховатости поверхности. Нами были исследованы сверхгладкие полированные детали из кварца и ситала, применяемые в качестве подложек для многослойных интерференционных зеркал в лазерных гироскопах.

Методы исследования

Индикатриса рассеяния, измеряемая методом РР, пропорциональна функции СПМ в приближении теории возмущения первого порядка:

$$\Pi(\theta) = \frac{1}{W_{\text{inc}}} \frac{dW_{\text{scat}}}{d\theta} = B(\theta_0, \theta, \lambda, \varepsilon) \text{PSD}_{1D}(f), \quad (1)$$

где W_{inc} — мощность излучения, падающего на поверхность; dW_{scat} — мощность, рассеянная

в интервале углов $d\theta$; $\text{PSD}(f)$ — одномерная функция СПМ. Коэффициент пропорциональности $B(\theta_0, \theta, \lambda, \varepsilon)$ не зависит от рельефа поверхности [1, 2]. Рассеяние в методе ДРС пропорционально двумерной функции СПМ [3]. Одномерная и двумерная функции СПМ связаны между собой следующим выражением:

$$\text{PSD}_{2D}(f) = -\frac{1}{2\pi} \int_f^{\infty} \frac{d}{d\nu} [\text{PSD}_{1D}(\nu)] \frac{d\nu}{(\nu^2 - f^2)^{1/2}}. \quad (2)$$

Методика АСМ позволяет получать непосредственно двумерную функцию рельефа поверхности. На основании этих данных рассчитывается функция автокорреляции

$$C(\rho) = \langle z(\rho + \rho') z(\rho') \rangle, \quad \rho \equiv (x, y), \quad (3)$$

где z — функция рельефа поверхности. Для изотропных производится усреднение автокорреляционной функции по углу и рассчитывается одномерная функция СПМ

$$\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}, \quad \vartheta = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad (4)$$

$$C(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(\rho, \vartheta) d\vartheta,$$

$$\text{PSD}_{1D}(f) = \int \cos(2\pi i f \rho) C(\rho) d\rho. \quad (5)$$

Таким образом, по результатам экспериментов, проведенных тремя разными методами, рассчитывалась и сравнивалась функция СПМ. Эта функция достаточно полно описывает статистические свойства поверхности, однако на практике удобно пользоваться единой количественной характеристикой ше-

^{*)} Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва.

^{**)} ФГУП НИИ «Полюс», Москва.

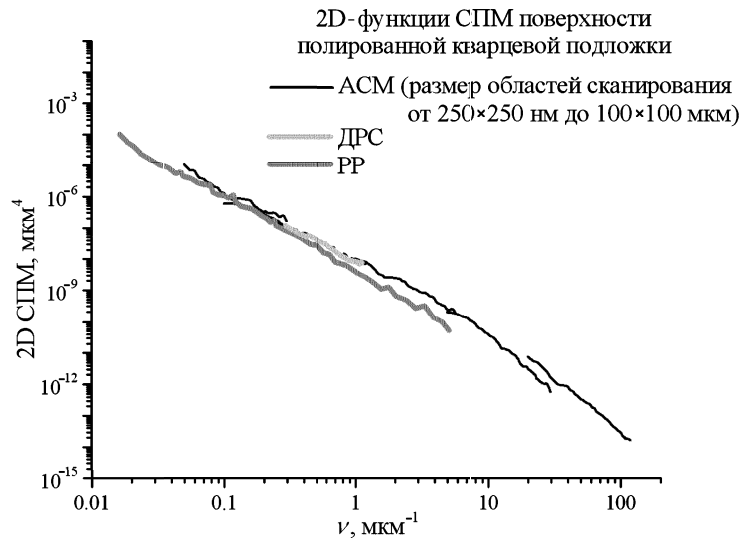


Рис. 1. Функции спектральной плотности мощности поверхности полированной кварцевой подложки, рассчитанные по данным методов АСМ, РР и ДРС

роховатости — эффективной высотой шероховатости поверхности:

$$\sigma_{\text{eff}}^2 = 2\pi \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \text{PSD}_{2D}(f) f df, \tag{6}$$

$$\sigma_{\text{eff}}^2 = \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \text{PSD}_{1D}(f) df.$$

Она представляет собой интеграл от функции СПМ в диапазоне пространственных частот, определяемых возможностями каждого метода. Для метода РР (длина волны 1.54 Å) область определения функции СПМ составляет 0.06 ÷ 5.1 мкм⁻¹, для метода ДРС (длина волны 632 нм) — 0.3 ÷ 1.1 мкм⁻¹, а для АСМ (Solver P47H, NT-MDT, максимальный размер области сканирования 100 × 100 мкм) — 0.02 ÷ 100 мкм⁻¹. Для сравнения результатов разных методик величина эффективной высоты шероховатости рассчитывалась в общей для данных методик области пространственных частот.

Экспериментальные данные

Сравнение результатов измерения методик АСМ, РР и ДРС проводилось на нескольких образцах полированного кварца. Наблюдалось хорошее совпадение хода функций СПМ, рассчитанных по данным трех методов. Экспериментальные функции СПМ, полученные для одного из образцов, представлены на рис. 1. Значение эффективной высоты шероховатости в частотном диапазоне 0.3 ÷ 1.1 мкм⁻¹ для этого образца составило 2.8 Å по данным АСМ, 2.2 Å по данным РР и 2.7 Å по данным ДРС. В узком диапазоне пространственных частот, определяемом возможностями метода ДРС, максимальный разброс значений эффективной высоты шероховатости не превышал 14%. В более широком диапазоне 0.06 ÷ 5.1 мкм⁻¹,

определяемом возможностями метода РР, значения эффективной высоты шероховатости составили 5.0 Å по данным АСМ и 4.5 Å по данным РР. В этом диапазоне пространственных частот расхождение методов составило 10%. Собственная погрешность определения функции СПМ для методов РР и ДРС составляла не более 10% [4]. Для АСМ ошибка в первую очередь определяется однородностью обработки поверхности (ввиду малых размеров области сканирования) и для исследованных образцов составила не более 15% (по измерениям на нескольких разных участках поверхности).

Было проведено сравнение шероховатости серии ситаловых подложек, выпущенных двумя разными изготовителями. На рис. 2 представлены функции СПМ для двух образцов (далее образец 1 и образец 2), полученные по данным АСМ и РР. Наблюдается хорошее совпадение функций СПМ, полученных двумя методами. Более того, для образца 1 шероховатость по данным РР и АСМ совпала и составила 4.5 Å в частотном диапазоне 0.06 ÷ 5.1 мкм⁻¹.

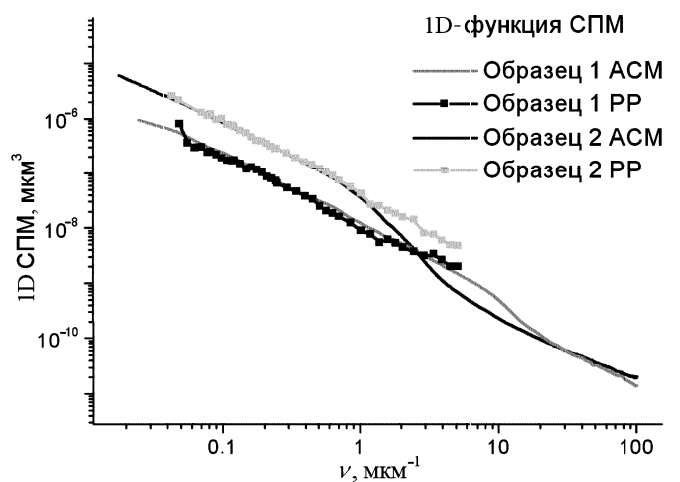


Рис. 2. Функции спектральной плотности мощности поверхности двух ситаловых подложек, рассчитанные по данным АСМ и РР

Для образца 2 шероховатость в том же частотном диапазоне составила по данным АСМ 2.7 \AA , а по данным РР — 2.2 \AA .

Заключение

Для различных подложек показано хорошее совпадение функций СПМ и значений эффективной высоты шероховатости, рассчитанных по данным методов АСМ, РР, а также ДРС.

Выявленная для различных образцов разница в степени гладкости поверхности согласуется с испытаниями чувствительности гироскопов, где использовались зеркала, нанесенные на исследованные подложки, а также со значениями коэффициентов отражения этих многослойных интерференционных покрытий как в рентгеновском, так и в оптическом диапазоне. Данный результат особенно важен с уче-

том того, что примененные методы исследования имеют различную природу взаимодействия с поверхностью.

Литература

1. *Asadchikov V.E., Duparre A., Jakobs A. et al. // Apl. Opt.* 1999. **38**, N 4. P. 684.
2. *Duparre A., Ferre-Borrull J., Gliech S. et al. // Apl. Opt.* 2002. **41**, N 1. P. 154.
3. *Azarova V.V., Dmitriev V.G., Lokhov Yu.N. et al. // J. Opt. Technol.* 2002. **69**. P. 125.
4. *Асадчиков В.Е., Кожевников И.В., Кривоносов Ю.С. // Кристаллография.* 2003. **48**, № 5. С. 897.

Поступила в редакцию
27.02.06