

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 617.7 535.34

ИЗМЕРЕНИЕ МЕЖАТОМНОГО РАССТОЯНИЯ
В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКЕ КРЕМНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО
СКАНИРУЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА© Е. В. Сысоев¹, А. В. Латышев²

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

² Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. им. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: evsml@mail.ru, latyshev@isp.nsc.ru

Исследовано влияние характеристик оптической системы интерферометра на распределение спектральной плотности мощности проходящего через неё частично когерентного света. Представлены результаты измерений эффективной длины волны для частично когерентного источника света, установленного в интерферометр. Показано, что оптическая система интерферометра искажает спектр источника света, что приводит к систематической погрешности при измерениях. Использование атомно-гладких поверхностей в качестве зеркал в опорном и измерительном плечах интерферометра позволило исследовать влияние оптической системы интерферометра на фазовые искажения. Установлено, что из-за фазовых искажений оптической системы имеет место систематическая погрешность измерения рельефа более 5 нм по высоте. Показано, что использование атомно-гладкой поверхности в качестве эталонного объекта измерения даёт возможность значительно снизить эту погрешность (до 0,12 нм). Приведены результаты измерений эшелона атомных ступеней со счётным числом одноатомных слоёв на поверхности кристаллического кремния. Впервые экспериментально методами оптической низкокогерентной интерферометрии измерено среднее значение межатомного (межплоскостного) расстояния в кристаллической решётке образца Si с ориентацией [111], которое составляет $3,145 \pm 0,003$ Å.

Ключевые слова: сканирующий интерферометр продольного сдвига, атомно-гладкая поверхность, интерферометр Линника, интерференционные измерения, межатомное расстояние, эшелон атомных ступеней.

DOI: 10.15372/AUT20210601

Введение. Топографические 3D-измерения поверхности основаны на интерференции света и расчёте фазового сдвига световой волны, вызванного изменением высоты рельефа для каждой точки измеряемой поверхности. Такой способ измерений широко используется при решении научных и метрологических задач, а также для контроля качества поверхностей изделий в промышленном производстве. Основными достоинствами интерференционных профилометров являются бесконтактность, высокое разрешение, высокая точность и простота в использовании. Измерения обычно выполняются с применением интерферометров продольного сдвига с делением амплитуды волнового фронта светоделителем. В этом случае обе части света проходят свой путь (в опорном и измерительном плечах интерферометра), после чего снова объединяются, образуя интерферограмму, распределение интенсивности в которой регистрируется на светочувствительной поверхности (например, на поверхности ПЗС-матрицы). Изменение оптического пути, вызванное изменением высоты рельефа измеряемой поверхности, приводит, в свою очередь, к изменению фазового

сдвига между электромагнитными волнами в опорном и измерительном плечах интерферометра. Фазовый сдвиг зависит также от эффективной длины волны света, качества поверхности опорного зеркала интерферометра, волновых искажений оптической системы интерферометра и пр.

Целью данной работы является исследование систематических и случайных погрешностей при измерении рельефа поверхности с субнанометровым и пикометровым разрешением и достижение предельно высокой точности измерений.

В работе представлены результаты исследований по значительному снижению погрешности измерения топографии поверхности, связанной с искажением волновых фронтов в интерферометре и с неопределённостью значения эффективной длины волны $\bar{\lambda}$. Кроме того, предложен способ радикального улучшения продольного разрешения и снижения систематической погрешности измерений путём применения уникального атомно-гладкого зеркала в качестве опорного зеркала интерферометра. Впервые методами низкокогерентной интерферометрии проведены оптические измерения среднего значения межатомного расстояния в кристаллической решётке образца кристалла Si.

Принцип измерения рельефа поверхности. Эксперименты по измерению рельефа поверхности в данной работе проводились с использованием экспериментальной установки (рис. 1) на базе сканирующего интерферометра продольного сдвига.

Интерферометр разработан в соответствии со схемой микроинтерферометра Линника [1]. Световая волна от источника частично когерентного света 4 проходит через коллимирующий объектив 5 и попадает на светоделитель 6, где расщепляется по амплитуде на две части. Одна часть световой волны распространяется в опорном плече, другая — в измерительном плече интерферометра. В опорном плече интерферометра волна света проходит через микрообъектив 7 и попадает на поверхность опорного зеркала 8, закреплённого на пьезоэлектрическом преобразователе 9. Распространяясь в измерительном плече интерферометра, волна света проходит через микрообъектив 10 и попадает на поверхность объекта измерения 11. Свет, отражённый от поверхностей опорного зеркала и объекта измерения, регистрируется матрицей ПЗС-камеры 12 в виде интерферограммы.

Измерение высоты рельефа $h(x, y)$ поверхности производится методом, описанным в [2], посредством расчёта разности фаз $\varphi(x, y)$ коррелограмм для всех измеряемых точек (x, y) :

$$h(x, y) + \Delta h + \delta h = \frac{\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y) + \delta\varphi}{2\pi} \frac{\bar{\lambda}_0 + \Delta\bar{\lambda}}{2}, \quad (1)$$

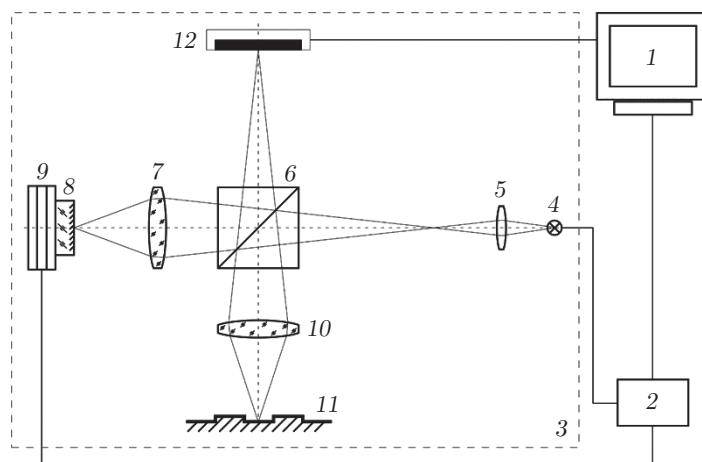


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

где $\bar{\lambda}_0$ — паспортное значение $\bar{\lambda}$; $\Delta\bar{\lambda}$ — систематическая погрешность $\bar{\lambda}$ (разность между измеренным и паспортным значениями); $\varphi(x, y)$ — разность фаз между коррелограммами, определяемая высотой измеряемой точки; $\Delta\varphi(x, y)$ — систематическая погрешность, зависящая от особенностей оптической системы интерферометра и объекта измерения; $\delta\varphi$ — случайная погрешность, определяемая совокупными шумами сигналов измерительного тракта, шероховатостью поверхности опорного зеркала и поверхности измерения, а также погрешностями вычислительных алгоритмов. Из выражения (1) следует, что для снижения погрешностей измерения высоты рельефа Δh и δh необходимо снижать $\Delta\varphi(x, y)$, $\delta\varphi$ и $\Delta\bar{\lambda}$.

Измерение эффективной длины волны низкокогерентного источника света в интерферометре продольного сдвига. Источник света является одним из основных элементов интерферометра. Неопределённость $\Delta\bar{\lambda}$ может вносить существенную систематическую погрешность в измерения. Для источников частично когерентного света, имеющих вид спектральной плотности мощности, близкой к гауссовой функции, этот параметр определяется максимальным значением регистрируемого сигнала в спектре источника света. Существенным является то, что измерение $\bar{\lambda}$ с использованием спектрометров не учитывает влияния характеристик оптической системы интерферометра на искажение регистрируемого распределения спектра источника света.

Для более точного измерения $\bar{\lambda}$ предложено использовать интерферометр в режиме фурье-спектрометра [3]. Выбор этого метода определяется простотой реализации, высокой точностью и достоверностью результатов.

Как известно, принцип работы спектрометра Фурье основан на использовании интерферометра продольного сдвига (оптические схемы Майкельсона, Линника, Захарьевского [4]), в котором в обоих плечах установлены зеркальные поверхности. Равномерное движение одного из зеркал приводит к изменению интенсивности из-за разницы оптических путей в плечах интерферометра. В результате можно получить зависимость интенсивности от времени (или величины сдвига зеркала). Функция времени связана с её спектром через обратное преобразование Фурье:

$$f(\nu) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) e^{-i\nu t} dt, \quad (2)$$

где ν — частота, $f(\nu)$ — функция переменной частоты, $F(t)$ — функция времени (или величины сдвига зеркала). Таким образом, с помощью зависимости интенсивности интерференционного сигнала от времени и обратного преобразования Фурье можно получить зависимость интенсивности от частоты. В реальном интерферометре реализовать такую сложную процедуру сканирования не всегда представляется возможным. Это связано с большим диапазоном и высокими требованиями к точности перемещения зеркала.

В данной работе предложен пассивный способ сканирования. Суть его заключается в следующем. В измерительное плечо интерферометра устанавливается плоское зеркало под наклоном, который выбирается таким образом, чтобы изменение высоты рельефа в области измерения было меньше, чем длина когерентности источника света. По интерферограмме с использованием преобразования Фурье (2) рассчитывается распределение спектральной плотности источника света. В данном случае в качестве параметра t выступает линейная поперечная координата интерферограммы. Чтобы исключить точное измерение угла наклона зеркала при привязке к шкале частот, таким же образом производится измерение спектра стабилизированного по частоте (по провалу Лэмба) He—Ne-лазера.

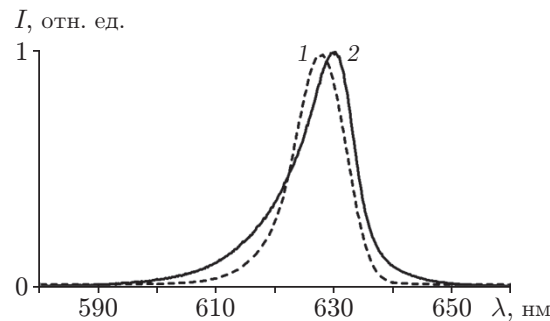


Рис. 2. Нормированные спектры источника света для красного светодиода, полученные с помощью: 1 — измерительной установки, 2 — спектрометра Qwave

Этот метод позволяет с высокой точностью привязать $\bar{\lambda}$ к длине волны He—Ne-лазера в конкретном интерферометре, используемом в измерениях. На рис. 2 показан спектр излучения для красного светодиода, полученного с помощью измерительной установки (1) спектрометра Qwave (компания Linos, Германия) (2).

Исследования показали, что спектры излучения для спектрометра Qwave и измерительной установки (в режиме фурье-спектрометра) различаются. Эффективная длина волны $\bar{\lambda}$, измеренная интерферометром, имеет смещение $\Delta\lambda \cong 5$ нм относительно результатов измерений, выполненных с помощью спектрометра Qwave. Второй спектр излучения шире, чем первый.

Таким образом, измерение спектрального распределения источника света с использованием интерферометра позволяет снизить систематическую погрешность и повысить точность измерения топографии поверхности.

Влияние нанощероховатости эталонного зеркала на погрешность измерения. Разность фаз между интерферирующими волнами опорного и измерительного плеч интерферометра определяется не только изменением высоты измеряемого рельефа поверхности, но и топографией поверхности в опорном плече интерферометра.

Для определения влияния нанощероховатости поверхности опорного зеркала интерферометра на результаты измерений проведены эксперименты с использованием экспериментальной установки (см. рис. 1).

В качестве источника частично когерентного света выбран светодиод с длиной волны 628,2 нм и длиной когерентности 11,8 мкм. Объектами измерения являлись образцы кристаллического кремния Si с ориентацией [111] (в дальнейшем Si) с одноатомными ступенями высотой 0,314 нм, которые представляют собой межатомное расстояние в кристаллической решётке [5]. Опорным зеркалом интерферометра служила высококачественная полированная стеклянная подложка с нанесённым слоем Al. Измерение нанорельефа поверхности проводилось методом частичного сканирования коррелограммы [2].

Результат измерения нанорельефа поверхности образца кристаллического Si с одноатомными ступенями приведён на рис. 3. Анализ выявил, что моноатомные ступени, расположенные в центральной части образца, не наблюдаются.

Расчёты показали, что случайная погрешность высоты измеренной поверхности δh , определяемая совокупной неопределённостью $\delta\varphi$ и рассчитанная как среднеквадратическое отклонение (СКО), составляет более 0,8 нм, что значительно больше высоты одноатомных ступеней.

Чтобы исключить влияние шероховатости поверхности опорного зеркала [6] и уменьшить δh , предложено использовать специально подготовленный образец кристалла кремния, содержащий атомно-гладкую поверхность в качестве эталонного зеркала [7, 8].

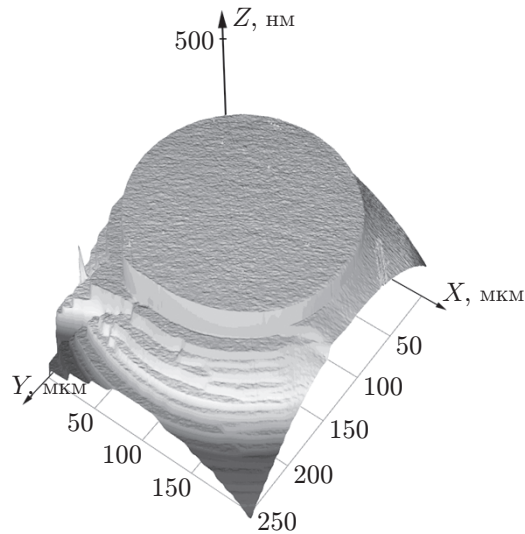


Рис. 3. Рельеф поверхности кристалла Si, содержащего одноатомные ступени

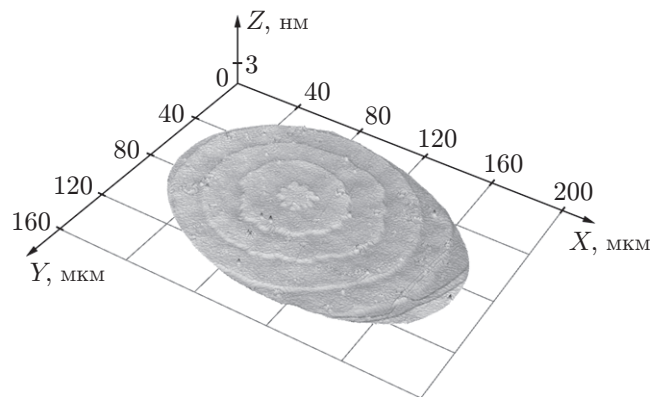


Рис. 4. Одноатомные ступени высотой 0,314 нм на поверхности кристалла Si с использованием атомно-гладкой поверхности в опорном плече интерферометра

Результаты измерения образца Si, содержащего одноатомные ступени высотой $d_{111} = 0,314$ нм, приведены на рис. 4.

Экспериментально показано, что использование атомно-гладкой поверхности в качестве опорного зеркала интерферометра позволяет радикально снизить δh до величины менее 0,02 нм. Полученные результаты подтверждают, что основным фактором, препятствующим проведению интерференционных измерений рельефа поверхности с субнанометровым разрешением, является наличие микро- и нанонеровностей поверхности эталонного зеркала.

Влияние фазовых искажений оптического канала интерферометра на погрешность измерений рельефа поверхности с субнанометровым разрешением. Как и в любой другой, в оптической системе интерферометра присутствуют волновые aberrации, которые зависят от поперечных координат поля измерения, от числовой апертуры оптической системы, от особенностей оптических компонентов и оптических материалов. При проведении фазовых измерений рельефа поверхности они вносят в результаты систематическую погрешность Δh , имеющую аддитивный характер.

Для определения величины этой погрешности в опорном плече интерферометра установлена атомно-гладкая поверхность, которая не содержит одноатомных ступеней в обла-

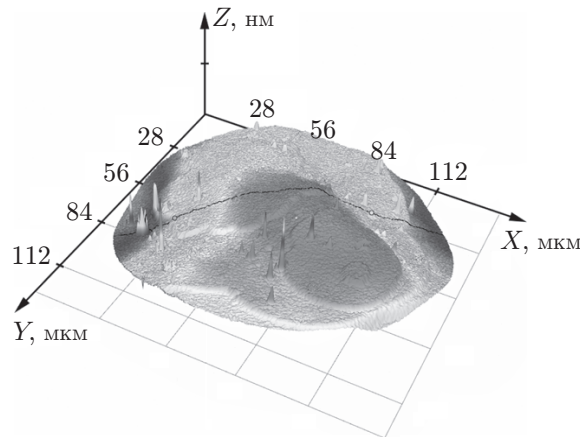


Рис. 5. Одноатомные ступени на поверхности кристалла Si, искажение рельефа по высоте превышает 5 нм

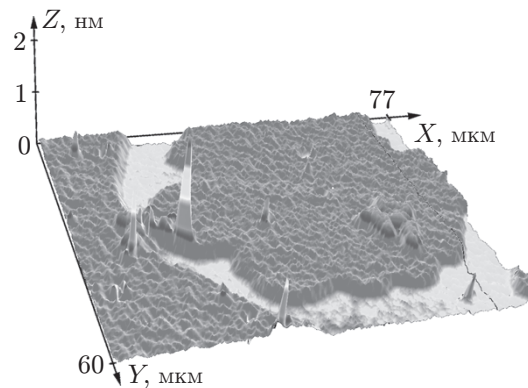


Рис. 6. Фрагмент поверхностного нанорельефа кристалла Si, содержащий одноатомные ступени высотой $d_{111} = 0,314$ нм

сти измерений. Результат измерений представлен на рис. 5.

Анализ показал, что изменение высоты рельефа по высоте в зависимости от поперечных координат поля измерения составляет величину $\Delta h \geq 5$ нм.

В данной работе для устранения этой погрешности в измерительное плечо интерферометра в качестве эталонной плоской поверхности устанавливается атомно-гладкая поверхность. Производится контрольное измерение её рельефа. В последующих измерениях вычитаются рельеф объекта измерения и рельеф контрольного измерения.

На рис. 6 показан результат измерения фрагмента объекта, представленного на рис. 5, после коррекции фазовых искажений.

Учёт погрешности, связанной с функцией передачи фазы, позволил снизить систематическую погрешность измерения нанорельефа поверхности в пределах рабочего поля до $\Delta h \leq 0,12$ нм. При этом случайная погрешность измерений составила $\delta h \leq 0,02$ нм.

Измерение межатомного расстояния в кристаллической решётке Si с ориентацией [111]. Как показано выше, использование атомно-гладких поверхностей в интерферометре может значительно уменьшить погрешность измерения нанорельефа поверхности. Впервые было выполнено измерение высоты одноатомных ступеней с разрешением менее 0,02 нм с использованием оптической интерференции.

Для дальнейшего снижения погрешности измерений расстояния между атомными слоями в кристалле Si было предложено выполнить измерение эшелона атомных ступеней [9],

содержащего счётное число атомных слоёв. Для этого был изготовлен специальный образец, содержащий эшелон атомных ступеней (чередующийся одноатомных ступеней) высотой 41 атом Si. Мониторинг и подсчёт количества атомных слоёв осуществлялся с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (AFM Solver P47-PRO фирмы NT MDT). Результаты измерений эшелона показаны на рис. 7.

Дальнейшие эксперименты выполнялись с использованием метода дифференциального рельефа. Суть этого метода заключается в следующем. Проводились два последовательных измерения вышеописанного эшелона атомных ступеней. Перед вторым измерением объект перемещался в поперечном направлении на определённую величину (в данном случае 20 мкм). Затем рассчитывалась разница между первым и вторым рельефами. Поскольку функция фазовых искажений в обоих измерениях одинакова, то в дифференциальном рельефе (при вычитании) эта функция исключалась. На рис. 8, *a* показан результат измерения высоты в 41 атом в виде дифференциального 3D-рельефа.

Случайная погрешность, рассчитанная как СКО по выбранному фрагменту атомно-гладкой поверхности объекта измерения, составила 0,021 нм. На рис. 8, *b* показано распределение высот (гистограмма) дифференциального рельефа. Число 1 соответствует точкам нижней области рельефа, число 2 — точкам средней области, а число 3 — точкам верхней области. Расстояние между пиками 1-2 и 2-3 равно 12,89 нм и 12,9 нм соответственно. Эти расстояния соответствуют высоте эшелона ступени 41 атомный шаг. Несложный расчёт показывает, что среднее расстояние между плоскостями кристаллической решётки Si с ориентацией [111] равно 0,3145 нм. Расстояние между пиками 3 и 4 равно высоте одноатомной ступени 0,314 нм, которая также присутствует в измеряемом образце.

С учётом погрешности измерения длины волны (0,5 нм), устранения погрешности искажения фазы за счёт применения дифференциального метода измерений и радикального снижения влияния шероховатости опорного зеркала интерферометра при использовании атомно-гладкой поверхности впервые оптическим методом экспериментально измерено среднее расстояние между атомами (межплоскостное расстояние) в кристаллической решётке Si. Погрешность измерения рассчитывалась [10] как погрешность измерения высоты эшелона (в данном случае 0,021 нм), делённая на удвоенное число атомных слоёв в

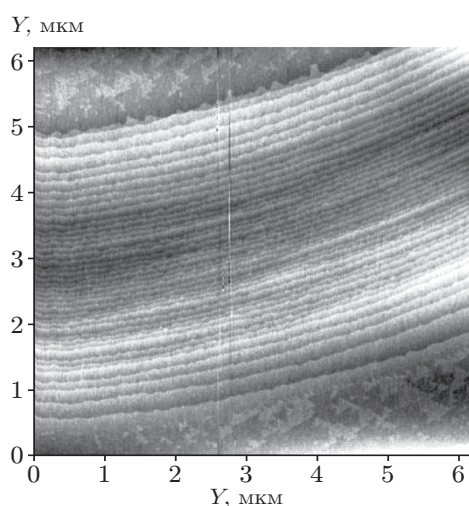


Рис. 7. Эшелон атомных ступеней высотой 41 атом, измеренный с помощью AFM Solver P47-PRO

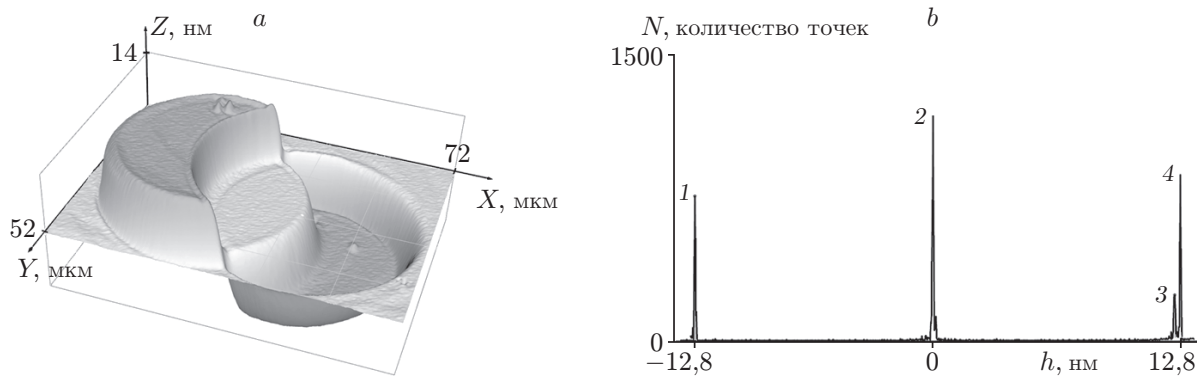


Рис. 8. Результаты измерений эшелона атомных ступеней: *a* — дифференциальный 3D-рельеф высотой 41 атом, *b* — гистограмма распределения высот дифференциального 3D-рельефа высотой 41 атом

эшелоне (82):

$$d_{111} = \frac{2H \pm \sqrt{2} \delta h}{2N} = \frac{25,79 \pm \sqrt{2} \cdot 0,021}{82} = 3,145 \pm 0,003 \text{ \AA}.$$

Измеренное значение межатомного расстояния в данном образце Si составило $d_{111} = 3,145 \pm 0,003 \text{ \AA}$.

Заключение. В данной работе представлены результаты исследований по выявлению источников систематических и случайных погрешностей при измерении рельефа поверхности с субнанометровым и пикометровым разрешением. Предложены способы по радикальному увеличению точности измерений.

Впервые экспериментально с помощью оптической низкокогерентной интерферометрии измерено межатомное (межплоскостное) расстояние в кристаллической решётке образца Si с ориентацией [111] и показано, что оно равно $3,145 \pm 0,003 \text{ \AA}$.

Предложен метод измерения эффективной длины волны источника света в интерференционном микроскопе с привязкой к длине волны стабилизированного He—Ne-лазера с погрешностью менее 0,5 нм.

Предложено использовать атомно-гладкую поверхность в качестве эталонной поверхности в измерительном плече интерферометра для устранения систематической погрешности (менее 0,12 нм), связанной с фазовыми искажениями оптической системы интерферометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Г. В. Интерференционная микроскопия // УФН. 1953. **50**, вып. 6. С. 271–302.
2. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 107–115.
3. Chao T.-H., Lu Th. T., Davis R. S. et al. Compact liquid crystal waveguide based Fourier transform spectrometer for in-situ and remote gas and chemical sensing // Proc. SPIE. 2008. **6977**. 69770P.
4. Захарьевский А. Н., Панов В. А., Кузнецова А. Ф. Интерференционный микрообъектив // ОМП. 1960. № 6. С. 34–37.
5. Konsek S. L., Coope R. J. N., Pearsall T. P., Tiedje T. Selective surface modifications with a scanning tunneling microscope // Appl. Phys. Lett. 1997. **70**, N 14. P. 1846.

6. **Sysoev E., Kosolobov S., Kulikov R. et al.** Interferometric surface relief measurements with subnano/picometer height resolution // MSR. 2017. **17**, N 5. P. 213–218.
7. **Пат. 2453874 РФ.** Способ формирования плоских гладких поверхностей твердотельных материалов /С. В. Ситников, С. С. Косолюбов, А. В. Латышев. Опубл. 20.06.2012; Бюл. № 17. 33 с.
8. **Sitnikov S. V., Latyshev A. V., Kosolobov S. S.** Advacancy-mediated atomic steps kinetics and two-dimensional negative island nucleation on ultra-flat Si(111) surface // Journ. Cryst. Growth. 2017. **457**. P. 196–201.
9. **Homma Y., Aizawa N., Ogino T.** Ultra-large-scale step-free terraces formed at the bottom of craters on vicinal Si(111) surfaces // Jpn. Journ. Appl. Phys. 1996. **35**. P. L241–L243.
10. **МИ 2083-90 ГСИ.** Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М.: Изд-во стандартов, 1991. 9 с.

Поступила в редакцию 19.07.2021

После доработки 02.08.2021

Принята к публикации 04.08.2021
