

УДК 53.08

РАСШИРЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОФИЛОМЕТРА МОДЕЛИ 130

© 2019 г. А. Д. Ахсахалян¹, *, Н. Н. Салашенко¹

¹Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

*E-mail: akh@ipmras.ru

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.

После доработки 11.02.2019 г.

Принята к публикации 04.03.2019 г.

Проведена доработка отечественного серийного профилометра модели 130. Прибор дополнительно оснащен легко монтируемой штангой, на которой закреплен опорный шарик, смещенный относительно измерительной иглы на 30 мм. Перемещая шарик по эталонной плоскости, можно корректно измерять как микро-, так и макропрофиль (форму) поверхности, по которой перемещается игла, на максимальной длине трассы (12.5 мм). Проведено сравнение результатов измерений по старой и новой схемам. Показано, что они совпадают с точностью 0.1 мкм. Определены систематические ошибки и точность измерений с использованием исходной и доработанной схем прибора. Приведены результаты измерений поперечного профиля канавок травления на длине 12 мм. Измерена форма поверхности цилиндрического рентгеновского зеркала на длине 40 мм.

Ключевые слова: профилометр, профиль поверхности, форма поверхности.

DOI: 10.1134/S0207352819100032

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с работ Гебеля и Шустера [1, 2] в разных странах ведутся исследования по развитию технологии изготовления фокусирующих многослойных зеркал для жесткого рентгеновского диапазона длин волн ($\lambda \approx 0.1$ нм). Авторы [1, 2] предложили наносить градиентную многослойную структуру на цилиндрические поверхности с направляющей в форме параболы или эллипса. Цилиндрические зеркала широко применяются для коллимации или фокусировки излучения рентгеновских трубок с линейным анодом. В настоящее время такими зеркалами оснащаются практически все современные дифрактометры. Для коллимации или фокусировки излучения точечных рентгеновских источников используют составленные из таких зеркал скрещенные системы Киркпатрика–Байеза или зеркала в форме фигур вращения с направляющей в виде параболы или эллипса [3].

В Институте физики микроструктур РАН работы по изготовлению и исследованию фокусирующих многослойных зеркал для жесткого рентгеновского диапазона проводятся начиная с 1999 года. Основные методы, используемые для получения цилиндрических поверхностей с направляющей в форме эллипса или параболы, — методы термопластического и упругого изгиба

стеклянных брусков, а также метод реплик [4–8]. Точность поверхности, изготовленной этими методами, не всегда бывает удовлетворительной. Для коррекции (улучшения) формы применяется метод реактивного ионно-лучевого травления с фокусирующей щелью [9, 10], позволяющий получить поверхность с любой требуемой точностью. Канавка травления представляет собой длинную ($L_x = 80$ мм), вытянутую вдоль щели (вдоль оси x) прямоугольную область, ширина которой L_y может меняться от 1 до 20 мм, в зависимости от ширины щели и расстояния щель–поверхность травления. В процессе травления поверхность перемещается перпендикулярно щели по закону движения, который рассчитывается методами математического моделирования. При расчете надо знать отклонение формы направляющей поверхности от расчетной и распределение скорости травления поперек щели. Эти величины должны быть предварительно измерены.

Метод реактивного ионно-лучевого травления используется также и при изготовлении зеркал с поверхностью в виде фигур вращения [11]. В этом случае необходимо обеспечить распределение глубины вытравленной канавки $H(y)$ в виде участков окружности с заданным законом изменения радиуса окружности вдоль щели $R = R(x)$. Ширина канавки травления по основанию со-

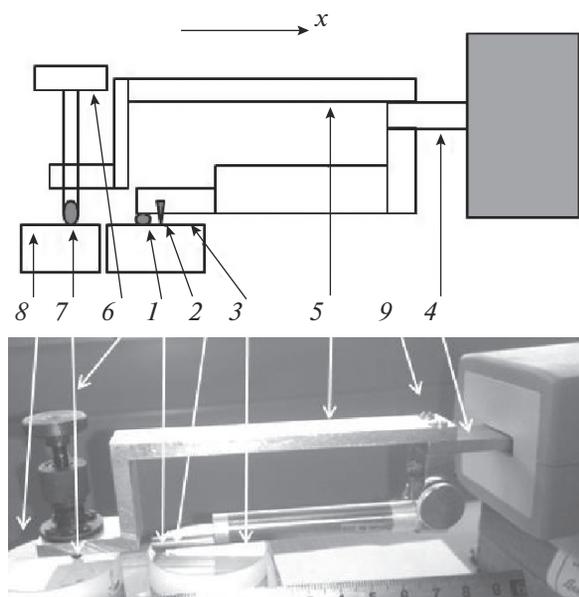


Рис. 1. Схема и фотография профилометра с привинченной штангой: 1 – опорный диск; 2 – алмазная игла; 3 – измеряемая поверхность; 4 – шток мотопривода; 5 – штанга; 6 – винт; 7 – опорный шарик; 8 – эталонная плоскость; 9 – крепежные винты.

ставляет 6–8 мм. Таким образом, как для коррекции формы цилиндрических поверхностей, так и для изготовления поверхностей вращения требуется точно измерять профиль канавки травления по ее ширине в различных сечениях на длине u от 1 до 20 мм.

Для таких измерений удобным прибором является доработанный профилометр модели 130 производства ОАО “Завод ПРОТОН-МИЭТ”. Одно из главных преимуществ прибора – высокая скорость измерений при точности порядка 0.1 мкм. Время измерения трассы длиной $L = 12.5$ мм составляет 30 с, поэтому за время ~5–10 мин можно определять средний профиль по 10–20 измерениям.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ДОРАБОТКА ПРОФИЛОМЕТРА

Профилометр модели 130 [12–14] предназначен для измерений параметров профиля и шероховатости поверхности по системе средней линии (ГОСТ 25142-82). Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности алмазной иглой (щупом) в процессе ее перемещения вдоль измеряемой поверхности. Игла имеет длительный срок службы и нецарапающее усилие 4 мН.

Прибор работает следующим образом (рис. 1). Измерительный блок состоит из сегмента диска 1 радиусом 125 мм и алмазной иглы 2 (радиус за-

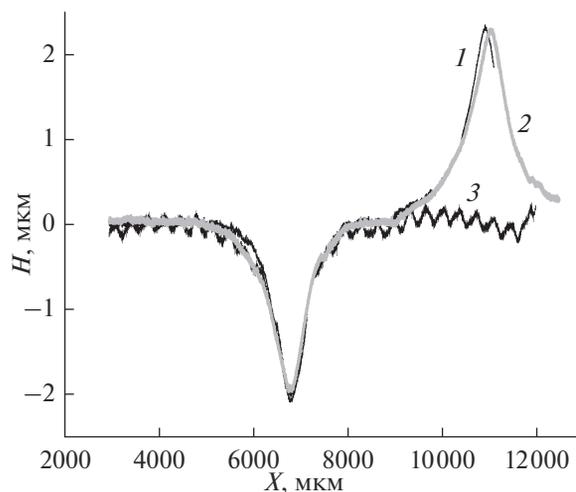


Рис. 2. Высота поперечного профиля канавки, измеренная с использованием: 1 – старой схемы; 2 – старой схемы с привинченной штангой; 3 – новой схемы.

кругления острия 10 мкм), связанной с индуктивным датчиком (диапазон измерений 250 мкм), чувствительность которого, заявленная изготовителем, 0.002 мкм. Диск опирается на измеряемую поверхность 3. Измерительный блок перемещается вдоль оси x при помощи безлюфтового мотопривода 4 относительно поверхности на расстояние 12.5 мм с шагом 0.5 мкм. Профиль измеряется относительно точки опоры диска на поверхность. Заявленная изготовителем точность измерений 0.1 мкм. Расстояние между центром диска и иглой равно $s = 4$ мм, поэтому прибор позволяет корректно измерять неровности с горизонтальным шагом не более 4 мм на участке поверхности длиной не более $w < s = 4$ мм. Это хорошо видно из рис. 2 (кривые 1, 2), где длина трассы больше, чем расстояние диск–игла. В этом случае справа от канавки появляется ложный пик из-за того, что диск проваливается в канавку, а игла движется по плоскости.

Отметим, что поскольку профиль измеряется относительно точки опоры диска, т.е. относительно неизвестной поверхности, измерения по этой методике являются в общем случае некорректными – измеренный профиль будет отличаться от истинного. Для максимально корректных измерений следует обеспечить перемещение опоры по поверхности с известной формой и с шероховатостью меньше ожидаемой при измерениях. Кроме того, необходимо, чтобы расстояние между точкой опоры и иглой s_1 было больше длины трассы ($s_1 > L = 12$ мм).

Для реализации этих двух условий была сделана следующая доработка прибора. На место крепления измерительного блока к штоку мотопривода привинчена (рис. 1) дополнительная штанга 5,

на которой установлен винт 6 с шариком 7, приклеенным к концу винта. Шарик опирается на эталонную плоскость 8 с отклонением от плоскостности не более 50 нм и шероховатостью менее 20 нм. Расстояние между иглой и центром шарика выбрано $s_1 = 30$ мм. Если закрутить винт, опора будет на шарик, и измерения будут проводиться по новой схеме, если открутить – опора будет на диск, и прибор будет работать в заводском исполнении. Если штанга мешает измерениям (например, при измерениях внутри отверстий), то за несколько минут она снимается.

СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СТАРОЙ И НОВОЙ МЕТОДИКЕ

Для сравнения методик в заводском и доработанном исполнении были проведены измерения одного и того же поперечного профиля канавки шириной по основанию 4 мм, вытравленной на плоскости методом реактивного ионно-лучевого травления.

Из рис. 2 видно, что результаты измерений по старой схеме (с опорой на диск) в заводском исполнении и с привинченной штангой (соответственно, кривые 1 и 2) совпадают с точностью 0.1 мкм. Как отмечалось выше, пик справа – фантом, и появляется он из-за того, что шарик проваливается в вытравленную канавку. Это хорошо видно по данным измерений по новой схеме с опорой на шарик (кривая 3), в которых форма впадины совпадает с кривыми 1 и 2 с точностью 0.1 мкм и на которой в зоне ложного пика ровная поверхность.

ИЗМЕРЕНИЯ НА ЭТАЛОННЫХ ПЛОСКОСТЯХ

Для определения точности и возможных систематических ошибок измерений по старой и новой схемам были проведены измерения эталонных плоских образцов с отклонением от плоскости не более 50 нм и с шероховатостью менее 20 нм.

На рис. 3 (кривая 1) представлен профиль, измеренный вдоль прямой в диапазоне $0 < x < 12.5$ мм по старой схеме. Затем образец был сдвинут на 5 мм и измерен вдоль той же прямой в диапазоне $5 < x < 17.5$ мм (кривая 2). Из рисунка видно, что кривые 1 и 2 практически совпадают (включая осцилляции), несмотря на довольно большое (0.7 мкм) отклонение от плоскости. Разность этих кривых (кривая 3), составляющая 20–30 нм, определяет точность измерений методики, а любая из кривых или их полусумма – систематическая ошибка прибора, и этот профиль надо вычитать из измеренного профиля при проведении измерений. Причиной отклонения профиля от нуля является, по-видимому, неплоскостность ползьев, по

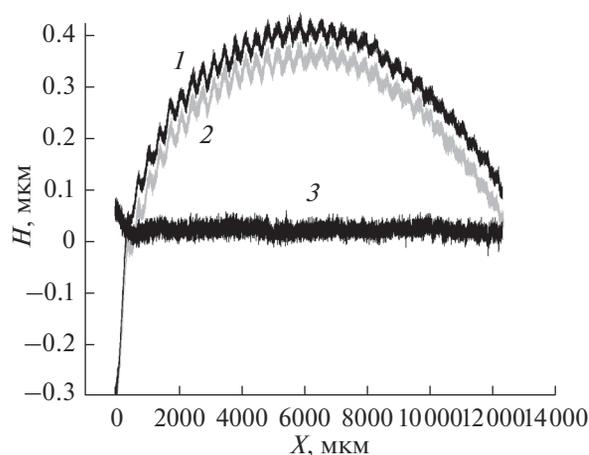


Рис. 3. Профилеграммы плоскости, снятые по старой методике вдоль трассы в диапазоне x : 1 – 0–12.5; 2 – 5–17.5 мм; 3 – разность кривых 2 и 3. Кривые 1 и 2 усреднены по десяти измерениям.

которым скользит мотопривод. Вероятная причина осцилляций – неравномерность резьбы или прецессия винта, который тянет измерительный блок.

При измерениях по новой методике профилеграммы 1 и 2 (рис. 4) снимали при движении по одной и той же трассе, но в противоположных направлениях (образец разворачивался на 180°). В обоих случаях опорный шарик 7 (рис. 1) скользил по одной и той же траектории. Измеренные профили оказались близкими. Их полусумма и есть систематическая ошибка (0.7 мкм), и этот профиль надо вычитать при проведении измерений, а разность (кривая 3) определяет точность методики (0.1 мкм).

Из рис. 3 и 4 видно, что точность измерений без вычета систематической ошибки в обеих схемах составила 0.7 мкм, что значительно хуже заявленной изготовителем прибора (0.1 мкм). Отметим, что наибольшее отклонение измеренных профилей от нуля наблюдается на первых 500 мкм трассы. Это связано, по-видимому, с выборкой люфтов в начале движения, и такие измерения целесообразно исключать. В этом случае точность измерений (без вычета систематической ошибки) составит примерно 0.3 мкм. Точность измерений за вычетом систематической ошибки в старой и новой схемах составила, соответственно, 30 и 100 нм.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТРАВЛЕНИЯ

Для минимизации времени травления при коррекции формы цилиндрических поверхностей методом реактивного ионно-лучевого травления с фокусирующей щелью необходимо знать распределение скорости травления поперек щели

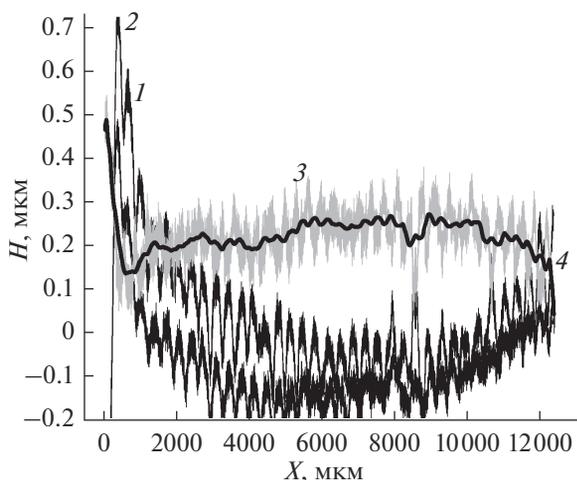


Рис. 4. Профилограммы плоскости, снятые по новой методике: 1 – исходный образец; 2 – разворот образца на 180° ; 3 – разность кривых 1 и 2; 4 – сглаженная по 1000 точкам (на длине 0.5 мм) кривая 3. Кривые 1 и 2 усреднены по десяти измерениям.

в зависимости от ее ширины и расстояния щель–поверхность травления. При использовании новой методики эти зависимости были измерены в [15].

На рис. 5 представлена серия измерений профилей для щели шириной 8 мм. Расстояние щель–поверхность менялось через 1 мм от 3 до 8 мм (соответствующие кривые 1–6). Видно, что по мере удаления поверхности от щели ширина профиля растет, а пиковое значение падает. Подобные измерения были проведены для щелей шириной 2–18 мм (профили шириной более 12 мм получали путем склейки). На основании этих данных можно проводить компьютерное моделирование процесса коррекции конкретных поверхностей для минимизации времени травления при заданном отклонении формы травленной поверхности от расчетной [16]. Данные этих экспериментов будут опубликованы в отдельной статье. Отметим, что проведение подобных измерений с использованием старой схемы возможно только для профилей шириной по основанию не более 4 мм.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Поскольку расстояние между шариком и иглой в новой схеме равно 30 мм, а длина трассы 12.5 мм, можно измерять последовательность профилей с наложением соседних профилей и их склейкой в области наложения на общей длине $30 + 12.5 = 42.5$ мм. Были проведены измерения направляющей поверхности рентгеновского зеркала в форме параболического цилиндра. Форму

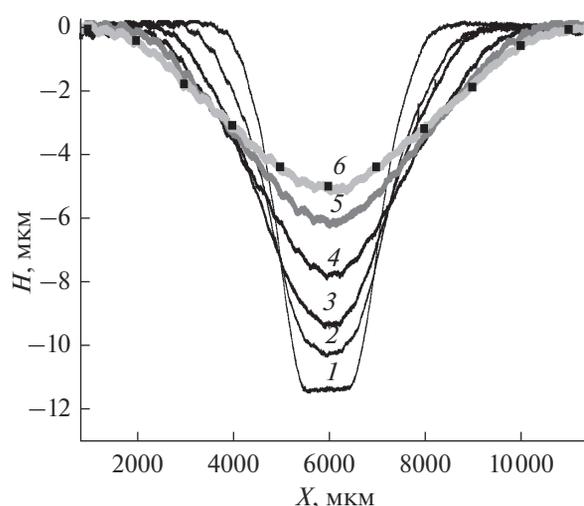


Рис. 5. Профили травления поперек щели шириной 8 мм, снятые на расстоянии от щели: 3 (1); 4 (2); 5 (3); 6 (4); 7 (5); 8 мм (6). Время травления 120 мин, ширина щели 8 мм.

направляющей предварительно измеряли триангуляционным методом [17], а также на интерферометре белого света Zygo по десяти склеенным профилям [18] (рис. 6, кривые 1, 2).

Измерение зеркала на профилометре 130 проводили следующим образом. Зеркало устанавливали на отдельном столике так, чтобы образующая поверхности была перпендикулярна трассе (направлению x на рис. 1). В начальном положении проводили десять измерений профиля, которые затем усредняли. Далее зеркало перемещали вдоль x на половину длины трассы $\Delta x = 6$ мм.

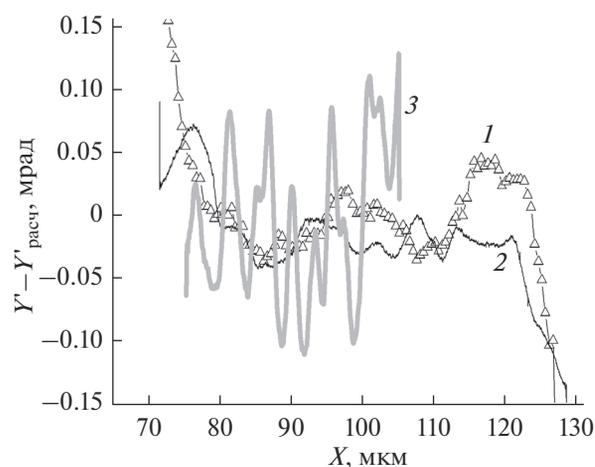


Рис. 6. Отклонение локального угла направляющей рентгеновского зеркала в форме параболического цилиндра от расчетного значения, измеренное: триангуляционным методом (1); на интерферометре ZYGO (2); на профилометре 130 (3).

Вновь снимали десять профилей, образец вновь смещали на 6 мм и так далее. Опорный шарик во всех случаях скользил по одному и тому же участку плоскости. Каждые десять профилей усредняли. В области пересечения соседних (усредненных) профилей вычисляли средние значения функций и их производных. После этого к каждому последующему профилю добавляли линейную функцию так, чтобы средние значения функций и их производных в области пересечения совпадали.

Действуя по приведенному алгоритму, был получен склеенный профиль на длине 40 мм (рис. 6, кривая 3). Из рисунка видно довольно хорошее совпадение формы направляющей поверхности, измеренной на профилометре, с данными, полученными триангуляционным и интерференционными методами. Разница в измерениях не превышает 0.2 мрад. Это свидетельствует о том, что прибор вполне пригоден для измерения формы поверхностей на длине до 40 мм (или большей, если увеличить расстояние шарик–игла) с указанной точностью. В отличие от двух других методик, на профилометре можно измерять и форму неполированных поверхностей.

ВЫВОДЫ

Осуществлена доработка серийного профилометра модели 130. Прибор дополнительно оснащен легко монтируемой штангой, на конце которой установлен шарик с опорой на гладкую эталонную плоскость, сдвинутый относительно измерительной иглы на 30 мм. В такой геометрии можно получать корректный микро- и макропрофиль (форму) измеряемой поверхности на максимальной длине сканирования прибора (12.5 мм) с точностью 0.1 мкм. При необходимости штанга за несколько минут снимается, и прибор может работать в заводском исполнении.

Проведено сравнение профилей, полученных по старой и новой методике. Показано, что профили совпадают с точностью 0.1 мкм.

Определены систематические ошибки и точность измерений с использованием старой и новой методик. Точность измерений без вычета систематической ошибки в обеих схемах составила 0.3 мкм (если исключить начальный участок трассы длиной 0.5 мм), что в три раза ниже заявленной изготовителем прибора (0.1 мкм). Точность измерений в старой и новой схемах составила за вычетом систематической ошибки, соответственно, 30 и 100 нм.

Представлены данные измерений по новой методике профилей травления шириной по основанию до 12 мм. Такие измерения по старой мето-

дике возможны лишь для профилей шириной по основанию до 4 мм.

Представлены результаты измерений направляющей поверхности рентгеновского зеркала в форме параболического цилиндра на длине 40 мм. Форма направляющей совпадает с данными, полученными триангуляционными и интерференционными методами с точностью 0.2 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФМ РАН Ю.Н. Дроздову и П.А. Юнину за полезные обсуждения. Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Соглашения № 075-02-2018-182 (RFMEFI60418X0202).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schuster M., Göbel H.H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 270.
2. Schuster M., Göbel H. // Adv. X-Ray Anal. 1996. V. 39. P. 57.
3. Shymanovich U., Nicoul M., Sokolowski-Tinten K. et al. // Appl. Phys. B. 2008. V. 92. P. 493. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3138-8>
4. Ахсаханян А.Д., Володин Б.А., Ключенков Е.Б. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 1. С. 162.
5. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Муравьев В.А., Харитонов А.И. // Поверхность. Рентгеновские., синхротр. и нейтрон. исслед. 2002. № 1. С. 51.
6. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Волгунов Д.Г. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 1. С. 78.
7. Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Kharitonov A.I. et al. // Central Eur. J. Phys. 2005. V. 3. Iss. 2. P. 163. <https://doi.org/10.2478/BF02475584>
8. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Вайнер Ю.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 1. С. 44.
9. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Вайнер Ю.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 2. С. 196.
10. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Вайнер Ю.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 6. С. 28.
11. Ахсаханян А.А., Ахсаханян А.Д., Мазо Л.А., Харитонов А.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 1. С. 86.
12. <http://www.xn--80aggyh2a5bzb.xn--p1ai/catalog/prochee-oborudovanie/profilometra-modeli-130.htm>
13. <http://www.ntcexpert.ru/vic/profilometry/642-profilometr-modeli-130>
14. <https://cyberpedia.su/13xf1b6.html>
15. Ахсаханян А.Д. Разлет плазмы при реактивном ионно-лучевом травлении с фокусирующей щелью //

- Матер. XXI Междунар. симп. “Нанозифика и нанозлектроника”, Нижний Новгород, 2017. С. 359.
16. *Ахсахалян А.Д., Нефедов И.М.* Новый алгоритм расчета закона движения зоны травления относительно образца для формирования поверхностей заданной формы // Тр. XVIII Междунар. симп. “Нанозифика и нанозлектроника”, Нижний Новгород, 2014. С. 289.
17. *Ахсахалян А.А., Ахсахалян А.Д., Волгунов Д.Г. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. ис- след. 2015. № 7. С. 93.
18. *Ахсахалян А.А., Ахсахалян А.Д., Волков П.В. и др.* Восстановление профиля поверхности с помощью двухлучевого поляризационного интерферометра // Матер. XX Междунар. симп. “Нанозифика и нанозлектроника”. Нижний Новгород, 2016. С. 350.

Extending the Measurement Capabilities of the Profilometer of the Model 130

A. D. Akhsakhalyan, N. N. Salashchenko

A modification of the domestic serial profilometer of the model 130 has been carried out. The device is additionally equipped with an easily mountable bar, on which a support ball is installed, displaced relative to the measuring needle by 30 mm. By moving the ball along the etalon plane, it is possible to measure correctly both the micro and the macroprofile (shapes) of the surface along which the needle moves, over the maximum length of the track (12.5 mm). A comparison of measurement results according to the old and new schemes is carried out. They are shown to coincide with a precision of 0.1 μm . Systematic errors and precision of measurements for the initial and modified schemes of the device are determined. The results of measurements of the transverse profile of the etching grooves over a length of 12 mm are presented. The shape of the surface of a cylindrical X-ray mirror over a length of 40 mm is measured.

Keywords: profilometer, surface profile, surface shape.