

УДК 681.7.062:681.7.03

## ПОДЛОЖКИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ

© 1999 г. А. И. Волохов, Э. П. Кругляков, Н. И. Чхало

Институт ядерной физики Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 03.04.1998 г.

Сообщается о результатах, полученных при полировании подложек для многослойных рентгеновских зеркал. Для окончательной доводки поверхности использовались ультрадисперсные алмазные микропорошки детонационной природы. Описывается методика, которой пользовались авторы при измерении шероховатости с субнанометровым разрешением.

Среди факторов, влияющих на коэффициенты отражения многослойных рентгеновских зеркал, подложки играют важную роль. Особенности это относится к зеркалам с периодом менее 3 нм. Как показывают простейшие оценки, допустимой является шероховатость на уровне долей нанометра. Во многом величина предельной шероховатости определяется размером зерна абразивного материала, применяемого при окончательной доводке подложек. Используемые в отечественной промышленности полирующие материалы: крокус, полирит, алмазные микропорошки статической природы, получаемые при высоком давлении, имеют размер исходных частиц более 0.1 мкм и позволяют получать шероховатость 0.6 нм для стекла К8 [1] и 0.6–0.7 нм для плавленного кварца [2]. В работе [3] сообщается о высоких результатах, полученных при полировании кремния (0.2–1.0 нм) и покрытий из химического никеля (0.8–1.0 нм). Однако, об использованных в этой работе полирующих материалах не сообщается.

В данной работе для окончательной доводки поверхности использовались ультрадисперсные алмазные микропорошки детонационной природы, имеющие размер зерна 4–6 нм. Описывается методика, которой пользовались авторы при измерении шероховатости с субнанометровым разрешением. Приводятся данные по величинам шероховатости, полученным при полировании подложек для многослойных рентгеновских зеркал.

### РЕЖИМЫ ПОЛИРОВАНИЯ

Эксперименты проводились на блоках диаметром 210 мм, содержащих 19 подложек диаметром 40 мм и толщиной 5 мм каждая. Шлифование и полирование подложек выполнялось на стандартном оборудовании по методу глубокого полирования. Для грубого и тонкого шлифования использовались карбид-кремниевые абразивы, в качестве инструмента – плоские шлифовальники из латуни ЛС-59. Полирование велось смоляными (смола марки СП-4; твердость 30, упругость

3.5) и пенополиуритановыми полировальниками с применением полирита (производства г. Нарва) при температуре в помещении  $24 + 0.5^{\circ}\text{C}$ .

Окончательная доводка делалась водными суспензиями ультрадисперсных алмазных микропорошков детонационной природы (производства НПО “Алтай” г. Бийск). Особенностью этого материала является предельно малый размер исходных частиц, средний размер их – 5 нм. Подробно о способах получения и физико-химических свойствах этих порошков описано в [4]. Концентрация ультрадисперсных алмазных микропорошков в суспензии 5–7%. На этой стадии использовался такой же инструмент, как и при полировании. Удельное давление в зоне абразивной обработки  $0.16 \text{ кг/см}^2$ , скорость вращения полировальника  $17 \text{ мин}^{-1}$ , блок с подложками совершал маятниковые движения со скоростью  $27\text{--}37 \text{ мин}^{-1}$ .

В работе исследовались образцы из плавленного кварца, кремния, оптического стекла К8 и никеля, электрохимически нанесенного на медные подложки.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика измерения шероховатости основана на изучении угловых зависимостей зеркального

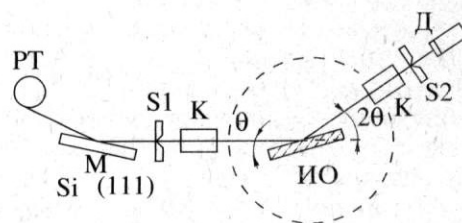


Рис. 1. Схема измерения шероховатости: РТ – рентгеновская трубка, М – монохроматор, S1 – входная щель, S2 – выходная щель, К – вертикальный коллиматор Соллера, ИО – исследуемый образец, Д – детектор.

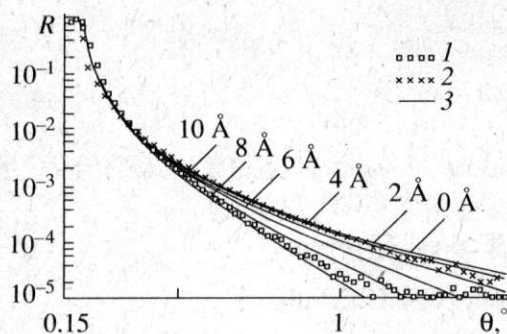


Рис. 2. Угловые зависимости коэффициентов отражения для кварца: 1 – после полирования полиритом, 2 – после полирования суспензией, содержащей алмазные микропорошки, 3 – теоретические кривые для различных шероховатостей.  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ .

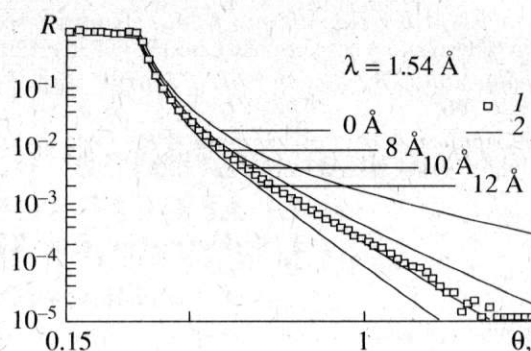


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициентов отражения для никеля: 1 – экспериментальные данные после полирования суспензией, содержащей алмазные микропорошки, 2 – расчетные кривые для разных шероховатостей.  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ .

коэффициента отражения  $R(\theta)$  рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = 0.154 \text{ нм}$  от поверхности подложки. Влияние шероховатости  $\sigma$  на зависимость  $R(\theta)$  учитывалось с помощью фактора Дебая–Валлера по формуле:

$$R(\theta) = R_{id}(\theta) \exp[-(4\pi\sigma \sin\theta/\lambda)^2],$$

где  $R_{id}(\theta)$  – отражение от идеальной поверхности,  $\theta$  – угол между плоскостью зеркала и падающим лучом (скользящий угол). Корректность такого подхода, а также ограничения на применимость этой простой модели подробно обсуждались в [5]. Расчет  $R_{id}(\theta)$  производился по формулам Френеля.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. При падении излучения на тестируемый образец часть пучка испытывает зеркальное отражение, часть рассеивается на шероховатостях. При этом в детектор попадает как зеркальная, так и диффузно-рассеянная компоненты. Доля рассеянной компоненты определяется размером щелей  $S1$  и  $S2$  и расстоянием между образцом и детектором. При типичных размерах щелей  $50 \text{ мкм}$  и расстояний между исследуемым образцом и щелью  $S2$   $200 \text{ мм}$ , в щель попадает излучение, рассеянное в угол  $\Delta\theta = 0.014^\circ$ . Эта величина сравнима с угло-

Полученные величины шероховатости при полировании ряда материалов суспензией, содержащей алмазные микропорошки

Материалы подложки	Шероховатость, нм	Разброс шероховатости, нм
Плавленый кварц	0.3	0.3–0.8
Стекло К8	0.5	0.5–1.0
Электрохимически нанесенный никель	1.0	1.0–1.2
Кремний	0.6	0.6–1.0

вой расходимостью падающего пучка и существенно меньше индикатрисы рассеяния [6]. Таким образом, погрешность определения зеркальной компоненты невелика.

На рисунке 2 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения для образца из плавленого кварца после полирования полиритом (1), после доводки в течение 40 ч суспензией, содержащей ультрадисперсные алмазы (2), различным значениям шероховатости. Как видно из рисунка, применение алмазной суспензии позволило улучшить шероховатость кварцевых подложек с  $1.0$  до  $0.25\text{--}0.3 \text{ нм}$ . На рисунке 3 приведены аналогичные зависимости для никеля, электрохимически нанесенного на предварительно полированные медные подложки. Шероховатость образца  $1.0 \text{ нм}$ . Сводные данные по достигнутым величинам шероховатости и разброс этих данных при использовании суспензий с различной степенью очистки приведены в таблице.

Применение ультрадисперсных алмазных порошков детонационной природы, имеющих предельно малый размер ( $4\text{--}6 \text{ нм}$ ) исходных частиц, для окончательной доводки подложек позволило получить величины шероховатости, сравнимые с мировыми [7]. Нерешенной проблемой является наличие единичных царапин, которые не позволили получить класс чистоты поверхности лучше 4 по ГОСТ 111141-84. Решение этой проблемы видится в улучшении качества очистки суспензий от крупных фракций, повышении чистоты помещения, в котором ведется полирование, отработке режимов полирования и применения нового инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов А.В., Кожевников И.В., Левашев Б.Е. и др. // Труды ФИАН. 1989. Т. 196. С. 21.

2. Богачёв М.Б., Колтыгин В.М., Плоткин М.Е. и др. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 51. С. 515.
3. Любарский С.В., Химич Ю.П. // Оптич. жур. 1994. Т. 1. С. 76.
4. Виноградов А.В., Кожевников И.В., Левашев Б.Е. и др. // Труды ФИАН. 1989. Т. 196. С. 47.
5. Лямкин А.И., Еришов А.П., Петров Е.А. и др. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. С. 611.
6. Виноградов А.В., Кожевников И.В., Левашев Б.Е. и др. // Труды ФИАН. 1989. Т. 196. Т. 32.
7. Takacs P.Z. // Synchrotron Rad. News. 1989. V. 2. P. 6.

## Substrates for Multilayer X-ray Mirrors

A. I. Volokhov, E. P. Kruhgliakov, N. I. Chkhalo

Results obtained by polishing of substrates for multilayer X-ray mirrors are reported. Ultra dispersed diamond powders of detonation nature with an average grain size of about 5.0 nm were used for fine processing of the substrates. The method of determination of subnanometric scale roughness is described in detail.