

09;13

## **Повышение дифракционной эффективности решеток-эшелеттов за счет полировки поверхности штриха ионно-пучковым травлением**

© М.В. Зорина<sup>1</sup>, С.Ю. Зуев<sup>1</sup>, М.С. Михайленко<sup>1</sup>,  
А.Е. Пестов<sup>1</sup>, В.Н. Полковников<sup>1,2</sup>,  
Н.Н. Салащенко<sup>1</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

E-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2016 г.

Показана возможность повышения эффективности первого порядка дифракции (до 10 раз) дифракционных решеток-эшелеттов из стекла Ф1 в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах длин волн за счет полировки поверхности штриха нейтрализованными ионами Ag с энергией 1250 eV. Обработка осуществляется при нормальном падении ионов на поверхность образца и съеме материала на уровне 80–300 nm. Предложен принцип оптимизации параметров процесса ионно-пучкового травления для решения конкретных задач по планаризации микроструктур с различными латеральными размерами.

Отражательные дифракционные решетки широко используются для получения спектров в рентгеновском диапазоне длин волн и являются основным средством спектральных исследований в таких областях науки, как физика твердого тела, физика горячей плазмы, космическая астрофизика и др. Известно, что в длинноволновой части спектра электромагнитного излучения (ИК, видимый, ближний ультрафиолет) высокое качество спектров можно получить с помощью решеток нормального падения. В рентгеновской области спектра эффективной дисперсии и высокого отражения можно достичь только при скользящем

падении, поэтому уравнение дифракции принимает вид

$$m\lambda = d(\cos \varphi + \cos \psi), \quad (1)$$

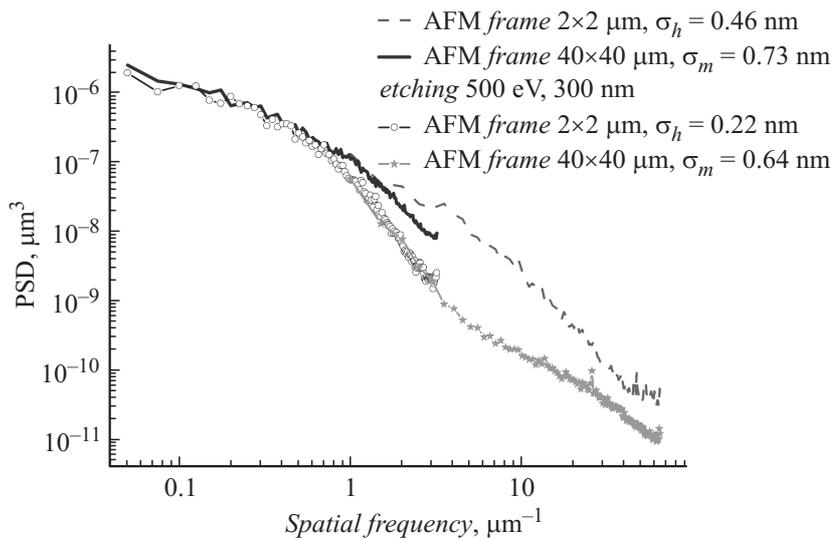
где  $\varphi$  и  $\psi$  — углы падения и дифракции соответственно, отсчитываемые от поверхности.

Для повышения эффективности в этой области длин волн применяются дифракционные решетки с блеском (решетки-эшелетты). Эшелетт (от франц. *echelette* — лесенка, лестница) — плоская отражательная, фазовая дифракционная решетка с треугольной формой штрихов используется как диспергирующий элемент в спектральных приборах [1,2] для разложения излучения в спектр. Максимальная эффективность достигается при соотношении между углами, называемом условием блеска:

$$\varphi + \gamma = \psi - \gamma, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — угол блеска. Основными техническими характеристиками дифракционных решеток являются эффективность первого порядка дифракции и спектральная селективность. Спектральная селективность определяется частотой штрихов, а эффективность — в том числе качеством штриха. Основным фактором, влияющим на снижение дифракционной эффективности, является шероховатость поверхности штриха дифракционной решетки. Традиционно дифракционные решетки-эшелетты изготавливаются механической нарезкой. При такой процедуре происходит развитие шероховатости поверхности плоскости штриха, что приводит к значительному рассеянию излучения и соответственно снижению дифракционной эффективности.

В данной работе предлагается методика полировки поверхности штриха дифракционной решетки из стекла Ф1 ионной бомбардировкой. В основе предложения применения ионно-пучкового травления для сглаживания шероховатости штрихов дифракционной решетки являются результаты работы [3], в которой изучалось влияние параметров процесса ионно-пучкового травления на частотные свойства шероховатости поверхности плавленого кварца и сложных керамик: ситалл, Zeradur и ULE. В работе было показано, что при определенных условиях происходит сглаживание только высокочастотных шероховатостей с латеральными размерами менее  $1 \mu\text{m}$  (микрошероховатости), в то время как неровности с большими латеральными размерами практически оставались неизменными. На рис. 1 приведены



**Рис. 1.** PSD-функции шероховатостей поверхности подложки из плавленого кварца, полученной методом ГШП. Верхние кривые — исходная, нижние — после травления ионами Ag с энергией 500 eV, съем 300 nm ( $\sigma_h$  — микрошероховатость,  $\nu \in (10^0 - 10^2 \mu\text{m}^{-1})$ ,  $\sigma_m$  — среднечастотная шероховатость  $\nu \in (10^2 - 10^0 \mu\text{m}^{-1})$ ).

функции спектральной плотности мощности шероховатости (PSD — power spatial density) в зависимости от пространственной частоты, измеренные с помощью атомно-силового микроскопа на стенде [4], для относительно „грубой“ (эффективная шероховатость  $\sigma_{eff} > 1 \text{ nm}$ ) подложки из плавленого кварца. Кривые без символов соответствуют изначально приготовленной подложке; эффективная шероховатость, представляющая интеграл PSD-функции в диапазоне пространственных частот  $\nu \in (10^{-2} - 10^2 \mu\text{m}^{-1})$ , составила 1.2 nm. Кривые с символами соответствуют этой же поверхности, но после травления нейтрализованными ионами Ag с энергией 500 eV, при нормальном падении и глубине съема около 300 nm. Эффективная шероховатость после травления упала примерно до 1 nm, в то время как микрошероховатость в области пространственных частот  $\nu \in (10^0 - 10^2 \mu\text{m}^{-1})$  упала более чем в 2 раза (PSD-функция падает при  $\nu > 6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ). Таким

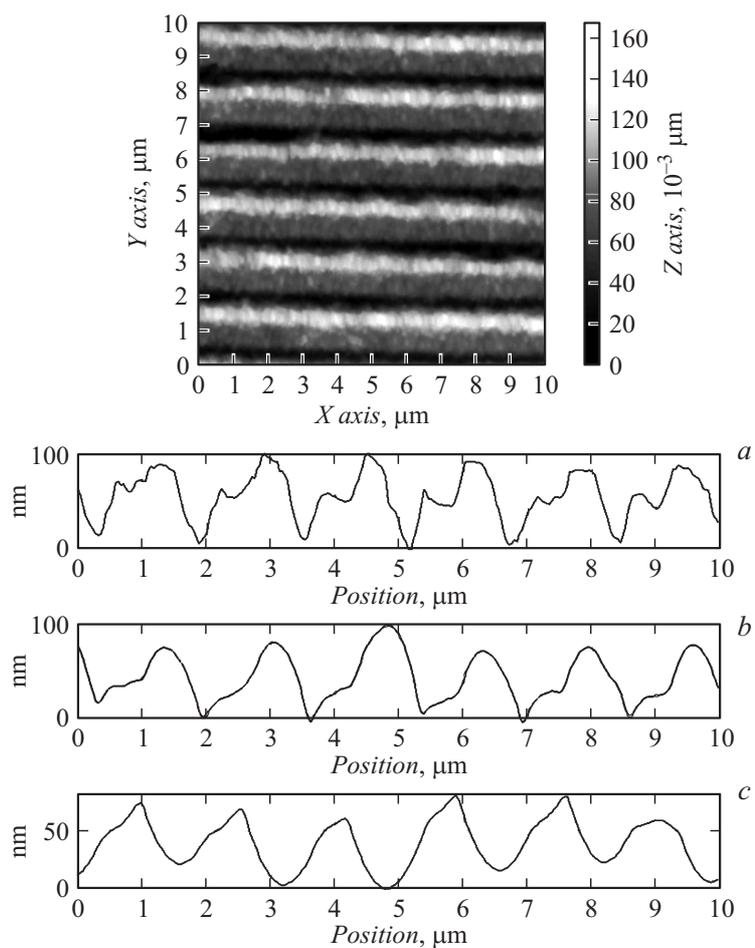
Эффективность первого порядка дифракции

Длина волны, nm	До травления, %			После травления, %			Покрытие Cr/C, %	
	ДР1	ДР2	ДР3	ДР1	ДР2	ДР3	ДР2	ДР3
4.47(C)	0.4	2.0	—	3.0	5.2	—	11.2	13.6
6.4(Mo)	2.5	4.0	0.4	10.0	9.4	1.1	19.6	12.8
8.21(Zr)	5.2	4.7	1.6	13.0	7.8	3.0	18.4	9.8
11.2(Be)	6.3	—	—	10.1	—	—	13.3	—
13.5(Si)	6.3	3.1	4.1	8.0	3.9	10.9	9.8	3.3
17.1(Al)	3.2	—	3.1	3.7	—	10.2	4.6	1.3

образом, даже в случае „грубых“ поверхностей можно „сглаживать“ высокочастотные шероховатости, сохраняя средне- и низкочастотные на исходном уровне.

В данной работе в качестве источника ускоренных ионов использовался технологический источник с холодным катодом („КЛАН-104М“, Платар Россия), который позволяет работать с инертными и активными газами в диапазоне энергий 300–1500 eV, выходная апертура представляет собой круг с диаметром 100 mm. Источник формирует квазипараллельный пучок с плотностью ионного тока 0.25–1.25 mA/cm<sup>2</sup>. Подробно установка описана в [5].

Обработка поверхности дифракционных решеток осуществлялась нейтрализованными ионами Ag с энергией 1250 eV (оптимальная энергия с точки зрения скорости травления и сглаживания шероховатости [6]) при нормальном падении. Съём при каждом травлении составлял ~ 150 nm равномерно вдоль всей поверхности решетки. Равномерность травления обеспечивалась за счет фигурных диафрагм, установленных на выходе ионного источника. Для контроля глубины съема материала использовался „свидетель“ (пластина из стекла Ф1), часть поверхности которого закрывалась маской. В результате ионной бомбардировки на поверхности „свидетеля“ формировалась ступенька, высота которой измерялась на интерференционном микроскопе TalySurf SSI2000. До и после ионной обработки поверхность дифракционных решеток изучалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Ntegra (NT-MDT), а эффективность первого порядка дифракции — на рефлектометре на основе рентгеновского спектрометра-монокроматора



**Рис. 2.** Типовые АСМ-кадр и сечения кадра поперек штриха дифракционной решетки ДР1: *a* — исходная; *b* — 1-е травление (глубина съема 150 нм); *c* — 2-е травление (глубина съема 150 нм).

РСМ-500 [7]. Обработке были подвергнуты решетки-эшелетты из стекла Ф1 производства (ОАО „НПО ГИПО“, Казань, Россия): 1 шт. размером  $40 \times 30 \text{ mm}$  с плотностью штрихов  $600 \text{ mm}^{-1}$  (ДР1, угол

блеска  $3^\circ$ ), решетка для спектрометра РСМ-500 [1] и 2 шт. размером  $60 \times 70$  mm, с плотностью штрихов  $900 \text{ mm}^{-1}$  (ДР2 — оптимизированная на „короткие“ длины волн, угол блеска  $1^\circ$  и ДР3 — оптимизированная на „длинные“ длины волн, угол блеска  $2^\circ$ , предназначенные для разрабатываемого рентгеновского спектрометра по схеме Черни–Тюрнера [8]). Съем материала для решеток составил: ДР1 — 300 nm, ДР2 — 150 nm; ДР3 — 80 nm. Типовые АСМ-кадр и сечения АСМ-кадра поперек штриха дифракционной решетки до и после ионной обработки представлены на рис. 2.

Как можно видеть из рис. 2, наблюдается заметное сглаживание шероховатости поверхности штриха, а геометрия штриха становится более правильной треугольной формы. Это позволило существенно повысить эффективность первого порядка дифракции в широком диапазоне длин волн от  $\lambda = 4.47$  nm до  $\lambda = 17.1$  nm. Эффективность первого порядка дифракции дифракционных решеток до и после ионной полировки на различных длинах волн приведена в таблице. Дополнительно повысить эффективность дифракционных решеток ДР2 и ДР3 удалось за счет нанесения оптимального отражающего покрытия [9] (см. таблицу).

В работе показано, что методика сглаживания шероховатости с помощью ионных пучков, первоначально разработанная для финишной полировки плавного кварца и оптических керамик, может быть использована для полировки поверхности штрихов дифракционных решеток-эшелеттов и приводит к повышению эффективности первого порядка дифракции до 10 раз в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Дополнительное повышение эффективности производится нанесением отражающего покрытия, оптимизированного с учетом рабочего диапазона длин волн.

Важным результатом данной работы является демонстрация возможности использования хорошо сколламированных ионных пучков для прецизионной планаризации микроструктур. Также показаны основные принципы оптимизации параметров процесса планаризации микроструктур, заключающиеся в анализе динамики частотной зависимости PSD-функции. Параметры процесса выбираются таким образом, чтобы функция начинала падать с пространственных частот  $\nu_{min}$ , выше которой частоты должны быть „сглажены“.

Работа поддержана грантами РФФИ 15-02-07660, 14-02-00549, 16-07-00247 и 16-07-00306, Министерством науки и образования РФ и ЦКП „Физика и технологии микро- и наноструктур“ при ИФМ РАН.

## Список литературы

- [1] Лукирский А.П., Брытов И.А., Комяк Н.И. // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение, 1967. В. 2. С. 4–19.
- [2] Krumrey M., Kuhne M., Muller P. et al. // SPIE. 1991. V. 1547. P. 136–142.
- [3] Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. Iss. 17. P. 20 094–20 106.
- [4] Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016 102.
- [5] Забродин И.Г., Закалов Б.А., Каськов И.А. и др. // Поверхность. 2013. № 9. С. 109–112.
- [6] Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhaýlenko M.S. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. N 6. P. 1249–1256.
- [7] Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Зуев С.Ю. и др. // Поверхность. 2003. № 1. С. 70–77.
- [8] Догадин В.О., Зуев С.Ю., Салащенко Н.Н. // Поверхность. 2015. № 7. С. 77–86.
- [9] Chkhalo N.I., Gaikovich P.K., Salashchenko N.N. et al. // Thin Solid Films. 2016. V. 598. P. 156–160.