

## Перспективы применения реактивного ионно-пучкового травления плавного кварца смесью тетрафторметана и аргона для асферизации поверхности оптических элементов

© М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, А.А. Перекалов, М.В. Зорина, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,  
607680 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2022 г.  
В окончательной редакции 26 апреля 2022 г.  
Принято к публикации 26 апреля 2022 г.

Предложено использовать энергию разряда для синтеза химически-активных частиц с целью проведения коррекции формы и асферизации поверхности оптических элементов реактивным ионно-пучковым травлением. Собран стенд на основе радиочастотного источника ускоренных ионов КЛАН-105М, конструкция которого позволила работать с химически активными газами. Показана возможность увеличения скорости травления плавного кварца более чем в 5 раз по сравнению с ионным травлением инертными газами путем создания смеси тетрафторметана ( $\text{CF}_4$ ) и аргона (Ar) в соотношении 1:1, при сохранении исходно гладкой шероховатости поверхности ( $\sigma_{\text{eff}} \sim 0.3 \text{ nm}$ ) в диапазоне пространственных частот  $\nu \in [5.0 \cdot 10^{-2} - 6.4 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}]$ .

**Ключевые слова:** ионное травление, реактивное ионное травление, шероховатость, поверхность, рентгеновская оптика.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52792.111-22

### Введение

Развитие современной науки и технологии, в частности, таких передовых направлений, как МР микроскопия, космическая астрономия и проекционная ЭУФ нанолитография требует повышения качества оптических элементов. Короткая длина волны (единицы nm) накладывает жесткие требования как на форму, так и на шероховатость поверхности. Низкие коэффициенты отражения многослойных рентгеновских зеркал не позволяют применять многослойные оптические системы (более 3 элементов), так как интенсивность такой системы пропорциональна  $\sim R^n$ , где  $n$  — число элементов, а  $R$  — коэффициент отражения зеркал. Таким образом, с целью уменьшения количества элементов в системе прибегают к использованию асферических профилей сложной формы оптических элементов. Максимальное отклонение реального профиля поверхности зачастую предполагает значительное отклонение от ближайшей сферы (на уровне единиц—десятков  $\mu\text{m}$ ). Для решения задач глубокой асферизации формы поверхности оптических элементов коротковолновой области спектра (EUV, BEUV, SXR) применяют технологию ионно-пучкового травления [1–3]. Однако при создании поверхностей с отклонением от ближайшей сферы  $10 \mu\text{m}$  и более, разработчики сталкиваются с определенными трудностями, связанными, в первую очередь, с низкими скоростями травления (до  $50 \text{ nm/min}$ ), что приводит к длительным временам обработки, при которых возможно изменение выходных параметров источника ускоренных ионов. Кроме того, ионно-пучковое травление инертными газами очень сла-

бо влияет на ошибки поверхности среднечастотного диапазона пространственного спектра ( $10^{-3} - 10^0 \mu\text{m}^{-1}$ ) [4]. Таким образом, практически невозможно уменьшить амплитуду неоднородности с латеральными размерами порядка  $1 \mu\text{m}$ , тогда как они играют очень важную роль для достижения дифракционного предела пространственного разрешения изображающей оптики.

Для того чтобы повысить эффективность такого перспективного бесконтактного метода как ионно-пучковое травление, предлагается использовать энергию разряда для синтеза химически-активных частиц (ХАЧ) в плазме. В зависимости от значения давления, энергии и имеющихся ХАЧ характер процесса травления может варьироваться от чисто физического (ионно-пучкового) до чисто химического (реактивного). Помимо асферизации и коррекции ошибок формы, реактивное ионно-пучковое травление может использоваться для удаления нарушенного слоя после процедуры механической полировки или точения без проникновения ионов в объем, а также для очистки поверхности от загрязнений. Например, производить чистку коллекторного зеркала лазерно-плазменного источника от продуктов эрозии вследствие лазерной искры или оптических элементов литографа от углеводородных загрязнений частицами фоторезиста [5].

### 1. Описание установки и экспериментов

Для настоящей работы был собран стенд (рис. 1), состоящий из 1 — вакуумной камеры; 2 — подвижной

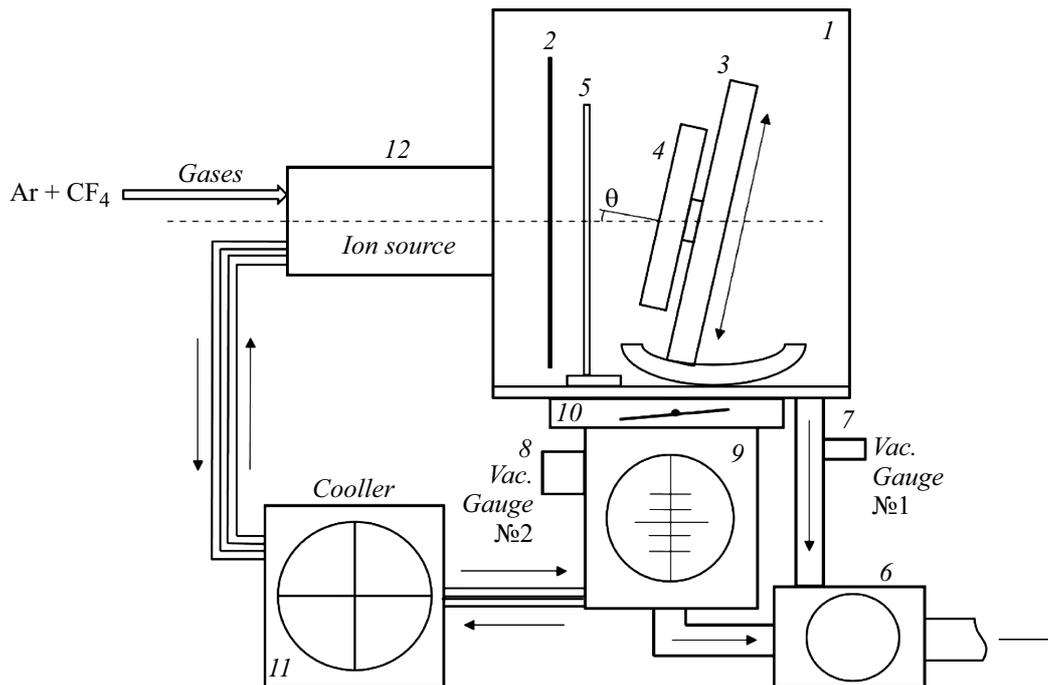


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

заслонки, электрически отвязанной от элементов конструкции, что позволило использовать ее как измеритель ионного тока при прогреве источника ускоренных ионов; 3 — моторизованной линейной подвижки с перемещением по высоте в диапазоне 300 мм и с возможностью наклона в пределах  $0-60^\circ$  (угол отсчитывается от нормали); 4 — вращающегося столика для крепления образцов; 5 — рамки для крепления формирующих профиль ионного пучка диафрагм; 6 — безмасляного форвакуумного насоса; 7 — термопарной вакуумной лампы ПМТ-6; 8 — магнито-разрядной вакуумной лампы ПММ-32; 9 — турбо-молекулярного насоса (ТМН); 10 — шибера; 11 — чиллера с дионизованной водой для охлаждения источника ускоренных ионов и ТМН; 12 — источника ускоренных ионов КЛАН-105М (НТК „Платар“). Давление остаточных газов в камере  $\sim 10^{-4}$  Па. Размеры вакуумного объема: цилиндр  $\varnothing 400$  мм, высотой 450 мм.

Источник КЛАН-105М — радиочастотный (рабочая частота 13.56 MHz) источник ускоренных ионов с плоской ионно-оптической системой. Выходная апертура —  $\varnothing 100$  мм. Расход газа —  $6-15$  см<sup>3</sup>/min. Максимальный ионный ток до 300 mA. Диапазон энергии ионов 0.2–1.5 keV. Рабочее давление газов в камере  $\sim 10^{-2}$  Па.

В качестве образцов использовались пластины из плавленого кварца марки KB — исходная эффективная шероховатость ( $\sigma_{\text{eff}}$ ) на уровне 0.3 nm в диапазоне пространственных частот  $\nu \in [5.0 \cdot 10^{-2} - 6.4 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}]$ . Максимальный размер образцов —  $200 \times 200 \times 60$  мм. Измерения шероховатости производились на стенде атомно-силовой микроскопии (АСМ) [6], кадры  $2 \times 2$  и  $40 \times 40 \mu\text{m}$  и соответствующая им PSD-функция (power

spectral density) приведены на рис. 2 и 3 соответственно). Восстановление PSD-функции из АСМ измерений и расчет эффективной шероховатости производился по методике, описанной в [6].

В рамках настоящей работы все эксперименты проводились под нормалью к плоскости образца. Образцы подвергались облучению ускоренными нейтрализованными (положительный пространственный заряд компенсировался путем ввода дополнительно источника электронов на выходе ионного источника) ионами аргона, а также смесью аргона (Ar) и тетрафторметана (CF<sub>4</sub>). Плотность ионного тока составляла  $0.25$  mA/cm<sup>2</sup>. Часть образца закрывалась маской для определения глубины травления. Полученная в результате травления ступенька на границе маски измерялась на интерферометре белого света Talysurf CCI2000.

## 2. Результаты и обсуждение

Были проведены серии экспериментов с использованием ионов аргона в смеси с тетрафторметаном в соотношении 1:1 (соотношение контролировалось по парциальному давлению газов в камере). Глубина травления во всех экспериментах составляла  $\sim 200$  nm. Полученные зависимости скоростей травления и значений эффективной шероховатости от энергии ионов приведены на рис. 4.

Видно, что добавление тетрафторметана позволило существенно увеличить скорость травления во всем диапазоне энергий ионов. Более того, можно заметить, что зависимость скорости травления от энергии с до-

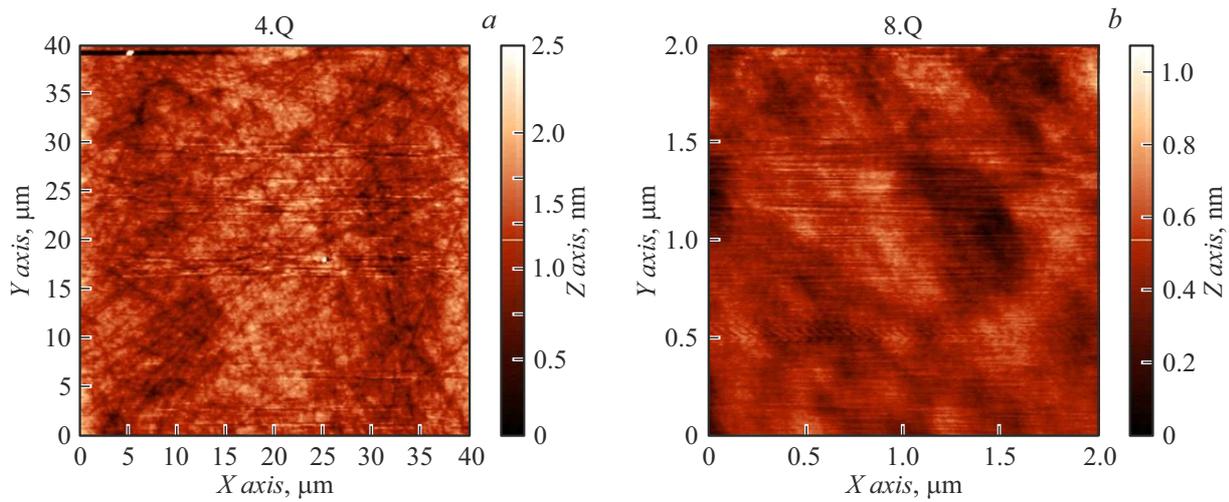


Рис. 2. АСМ кадры исходной поверхности плавленого кварца.

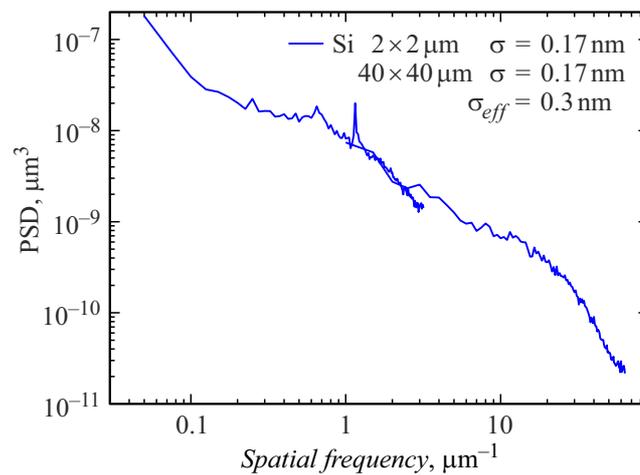


Рис. 3. PSD-функция исходной поверхности плавленого кварца.

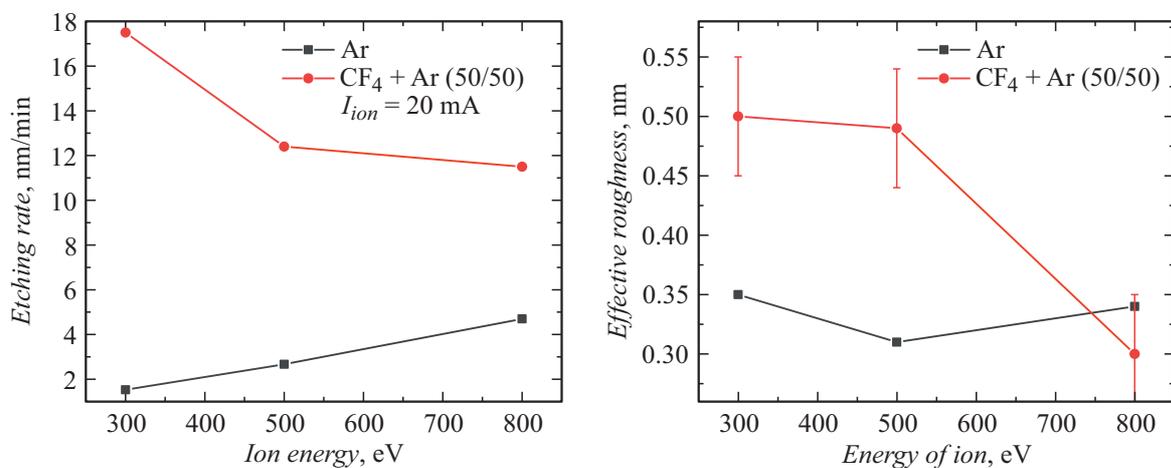
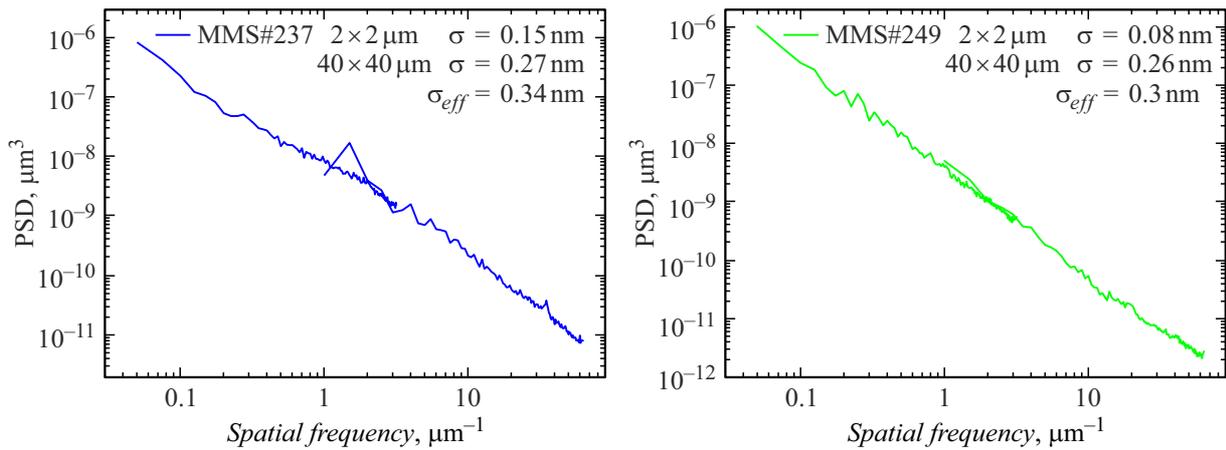
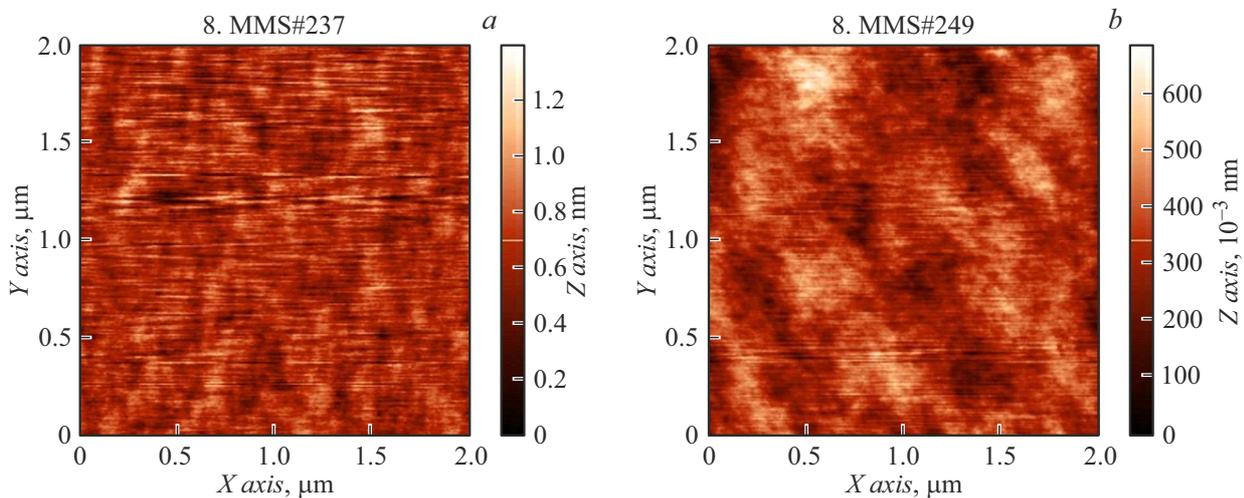


Рис. 4. Экспериментально полученные зависимости скорости травления (слева) и эффективной шероховатости от энергии ионов (справа).



**Рис. 5.** PSD-функции поверхностей плавного кварца после травления ионами аргона (слева) и смесью ионов аргона и тетрафторметана (справа). Энергия ионов — 800 eV.



**Рис. 6.** АСМ кадры  $2 \times 2 \mu\text{m}$  поверхностей плавного кварца после травления ионами аргона (слева) и смесью ионов аргона и тетрафторметана (справа). Энергия ионов — 800 eV.

бавлением ХАЧ имеет нисходящий тренд в отличие от случая чистого аргона, что говорит о разных преобладающих механизмах распыления в процессе травления при разных энергиях. При низких энергиях ионов (до 300 eV) основным механизмом является реактивное травление, а с увеличением энергии ионов увеличивается и глубина проникновения ионов под поверхность, что приводит к тому, что продукты химической реакции не покидают объем образца и преобладающим становится механизм физического распыления. Однако даже в таком случае скорость травления получается выше.

Наиболее важным параметром при обработке поверхности оптических элементов является значение эффективной шероховатости. Для всех экспериментов был проведен контроль эффективной шероховатости поверхности образца до и после травления. На рис. 4 показано, что наилучший (с точки зрения минимизации

шероховатости) результат был получен при энергии 800 eV. Ниже приведены построенные PSD-функции для образцов, облученных ионами аргона и смесью тетрафторметана и аргона с энергией 800 eV соответственно. При такой энергии высокочастотные неоднородности  $\nu \in [10^0 - 10^3 \mu\text{m}^{-1}]$  сгладились почти в 2 раза (рис. 5), что и можно видеть на АСМ кадрах  $2 \times 2 \mu\text{m}$  (рис. 6).

Таким образом, первые эксперименты по реактивному ионно-пучковому травлению показали возможность повышения скорости травления плавного кварца от 2.5 до более чем 5 раз при добавлении в пучок ионов тетрафторметана. Эффективная шероховатость поверхности в диапазоне пространственных частот  $\nu \in [5.0 \cdot 10^{-2} - 6.4 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}]$  при этом остается на исходном уровне или даже наблюдается сглаживание после процедуры травления во всем диапазоне энергий ионов (300–800 eV).

## Заклучение

В результате выполнения работы был разработан и изготовлен стенд для проведения асферизации поверхности оптических элементов методом реактивно ионно-пучкового травления. Показана возможность повышения скорости травления (коэффициента распыления) за счет использования химически активных частиц.

Экспериментально показано, что при использовании в качестве рабочей смеси газов тетрафторметана и аргона соотношении 1 : 1 (контроль по парциальному давлению газов в камере) удастся увеличить скорость травления плавленого кварца более чем в 5 раз по сравнению с чистым аргоном. При этом наблюдается сохранение или сглаживание шероховатости поверхности во всем диапазоне пространственных частот  $\nu \in [5.0 \cdot 10^{-2} - 6.4 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}]$ .

## Благодарности

Использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-72-30029.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] N.I. Chkhalo, A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, G. Zabrodin. *Precis Eng.*, **48**, 338–346 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [2] T. Arnold, G. Böhm, R. Fechner, J. Meister, A. Nickel, F. Frost, T. Hänsel, A. Schindler. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **616** (2–3), 147–156 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.11.013
- [3] M. Weiser. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **267** (8–9), 1390–1393 (2009). DOI: 10.1016/j.nimb.2009.01.051
- [4] M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, M.V. Zorina, S.Yu. Zuev, D.S. Kazakov, A.V. Milkov, I.L. Strulya, V.A. Filichkina, A.S. Kozlov. *Appl. Opt.*, **58**, 13 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.003652
- [5] M.S. Mikhailenko, D.S. Sidorov, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **387**, 73–76 (2016). DOI: 10.1016/j.nimb.2016.10.007
- [6] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 016102 (2015). DOI: 10.1063/1.4905336