

УДК 600:699

Исследование процесса ионно-лучевой полировки поверхности оптических деталей приборов

Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, В. В. Боровская, Е. С. Машкова

Представлены результаты экспериментального исследования процесса ионно-лучевой обработки с целью полировки поверхности оптического ситалла. Облучение образцов проводили ионами Ar^+ с энергиями 10—30 кэВ. Топографию поверхности исследовали с помощью зондового микроскопа FemtoScan. Показано, что азимутальное вращение облучаемого образца подавляет развитие волнообразного рельефа и дает эффект полировки — шероховатость поверхности уменьшается от исходного уровня $R_a \sim 1$ нм до 0,5 нм.

PACS: 07.60-j, 42.70.-a

Ключевые слова: оптический ситалл, распыление, ионная полировка, рельеф поверхности.

Введение

Ряд современных технологий обработки поверхностей материалов основан на применении ионно-лучевых методов, основным механизмом которых является распыление обрабатываемой поверхности [1]. Формирование морфологии поверхности и ее эволюции при ионном облучении было и остается предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [1—4]. Отметим, что почти для всех материалов обнаружены ситуации, когда на поверхности образуется наноразмерный волнообразный рельеф [4, 5]. Аналогичных данных, относящихся к оптическим материалам, опубликовано не слишком много. Тем не менее, в ряде работ изучали и обсуждали возможность уменьшения шероховатости и полировки поверхности оптических материалов (кварца и стекла) с помощью ионной бомбардировки [6, 7]. Интенсивно обсуждаются и возможные механизмы формирования топографии поверхности и полировки в процессе ионной бомбардировки, роль таких параметров как энергия ионов, угол падения ионов на мишень, флюенс облучения, температура облучения, вращение образца [7].

Цель данной работы — исследование процесса полировки поверхности оптического ситалла при

© Андрианова Н. Н., Борисов А. М., Боровская В. В., Машкова Е. С., 2012

скользящем падении ионов аргона с энергиями в десятки кэВ.

Методика эксперимента

В качестве мишеней использовали образцы оптического ситалла в виде шайб диаметром 22 и толщиной 5 мм. Исходная шероховатость поверхности после механической полировки составляла $R_a = 0,9—1,2$ нм. Очистку поверхности проводили с помощью петролейного эфира. Образцы монтировались на нагреваемом держателе мишени, позволяющем варьировать угол θ падения ионов на образец, а также осуществлять азимутальное вращение образца. При облучении угол θ выбирали в интервале $75—87^\circ$ и применяли азимутальное вращение образца (скорость вращения составляла ~ 1 об./мин).

Для облучения образцов ионами Ar^+ с энергиями 10—30 кэВ использовали дуговой источник с продольным магнитным полем установки масс-монохроматор НИИЯФ МГУ [8]. Выбранные в качестве бомбардирующих частиц ионы аргона обеспечивают высокие скорости физического распыления и не приводят к нежелательным химическим реакциям на поверхности. Плотность ионного тока составляла $\sim 0,3$ мА/см², флюенсы облучения $\varphi t > 10^{18}$ ион/см² (φ — плотность потока падающих ионов, t — время облучения).

Для решения проблемы компенсации положительного заряда диэлектрической мишени, вносимого ионным облучением, применяли алюминиевую оправку образца с тем, чтобы использовать вторичные электроны с алюминиевой поверхности для нейтрализации поверхностного заряда. Морфологию поверхности до и после облучения

Андрианова Наталья Николаевна, научный сотрудник.

Борисов Анатолий Михайлович, ведущий научный сотрудник.

Боровская Виктория Владимировна, младший научный сотрудник.

Машкова Евгения Сергеевна, ведущий научный сотрудник. НИИЯФ МГУ.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.
Тел. (495) 939-41-67. E-mail: andrianova_nn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

исследовали с помощью зондового микроскопа FemtoScan в атомно-силовом режиме. Чувствительность зондов позволяет получать изображение поверхностей с предельным разрешением по горизонтали до 0,05 нм и по вертикали — 0,01 нм. Измерения проводили на различных участках поверхности с размерами областей сканирования 2×2, 1×1 и 0,5×0,5 мкм. Программное обеспечение микроскопа позволяет рассчитывать основные параметры шероховатости поверхности. В данной работе сравнение шероховатости поверхности до и после облучения проводили по среднему арифметическому значению шероховатости поверхности R_a .

Результаты и их обсуждение

Анализ литературных данных и закономерностей развития и сглаживания рельефа поверхности материалов при ионной бомбардировке позволяет выбрать наиболее перспективные режимы ионного облучения для полировки поверхностей [1, 7]. Обычно при полировке используют ионы инертных газов. В данной работе, чтобы избежать различных химических взаимодействий на поверхности материалов, облучение производили ионами аргона, наиболее часто используемыми для целей полировки. Немаловажным фактором с точки зрения оптимизации процесса полировки является величина энергии ионов, определяющая в значительной степени величину скорости эрозии. С этой целью энергия ионов была выбрана достаточно большой, а именно, 10—30 кэВ. Чтобы минимизировать развитие под действием ионного облучения топографических элементов микронных размеров, таких, например, как различные конусообразные и пирамидальные структуры [2, 3], а также глубину, на которой образуются радиационные дефекты, облучение производят при достаточно больших углах падения ионов на мишень.

Однако при скользящем падении ионов возможно развитие такой топографической особенности, как нанометрический волнообразный рельеф [4—7, 9, 10]. В рассматриваемом нами случае показано, что в результате облучения поверхностей ситалловых образцов ионами аргона под скользящими углами формируется волнообразный рельеф с характеристической длиной волны λ от 30 до 100 нм и амплитудой 5—7 нм с волновым вектором, перпендикулярным плоскости падения ионного пучка. Типичный пример такого рельефа, обнаруженного при исследовании в атомно-силовом микроскопе поверхности облученного образца оптического ситалла, приведен на рис. 1, где также

отмечена характеристическая длина волны λ . Развитие волнообразного рельефа может значительно увеличить шероховатость поверхности образца. Действительно, в случае, представленном на рис. 1, параметр шероховатости R_a оказался примерно в три раза больше параметра, соответствующего образцу после механической обработки поверхности, и составил 2,8 нм.

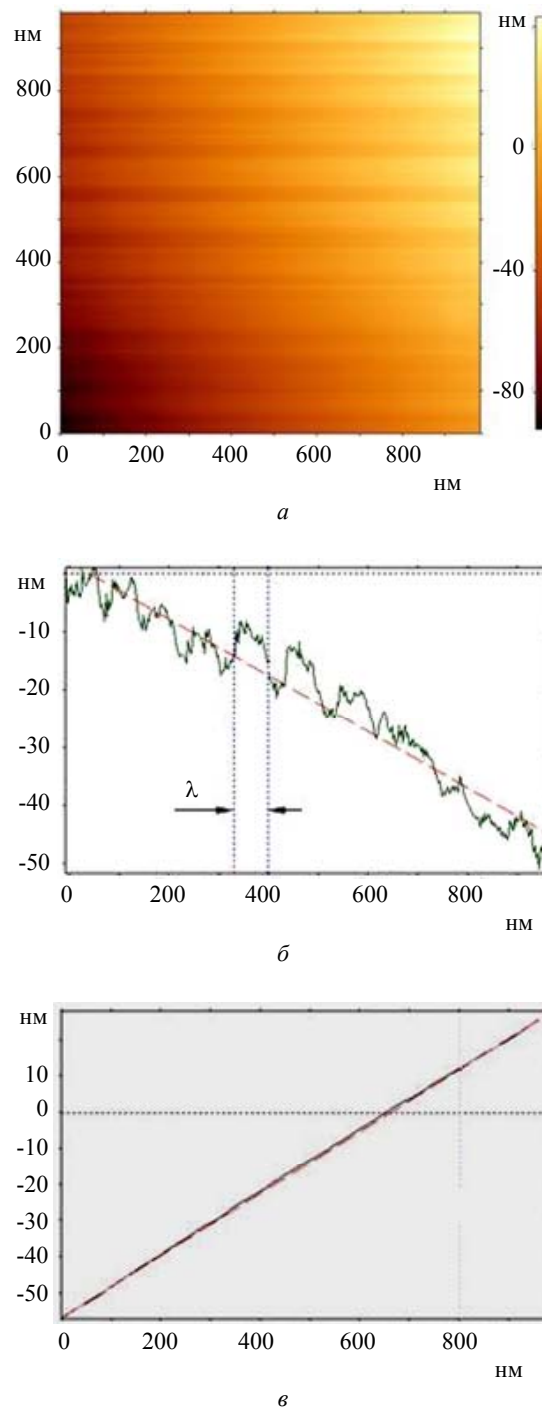


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности образца оптического ситалла (а) и профили волнообразного рельефа поверхности перпендикулярно (б) и параллельно (в) плоскости падения ионов. Пунктир — средняя линия профиля

Для устранения развития характерной для скользящего облучения волнообразной структуры в настоящей работе производили азимутальное вращение образца вокруг оси, перпендикулярной поверхности образца. Атомно-силовая микроскопия подтвердила отсутствие развития регулярного рельефа поверхности. Результаты измерений шероховатости, полученные при варьировании параметров облучения (энергии, угла падения ионов и времени облучения, температуры мишени) приведены на рис. 2. Оказалось, что определяющими факторами для полировки являются температура мишени и угол падения ионов. При температуре мишени $T \approx 200$ °С двухкратное уменьшение шероховатости до значений $R_a = 0,5$ нм найдено при угле падения $\theta = 79^\circ$. Сильное влияние температуры мишени на R_a обусловлено диффузионными процессами, приводящими к сглаживанию поверхности при ионном распылении [4, 5].

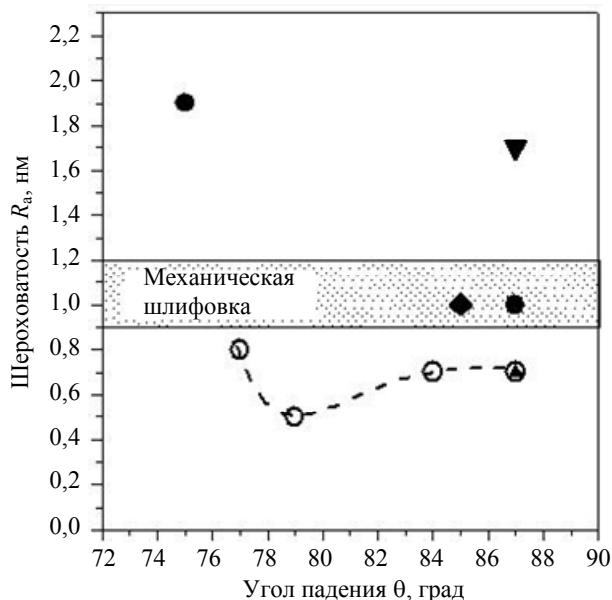


Рис. 2. Зависимость средней шероховатости поверхности оптического ситалла от угла падения ионов на образец. Параметры облучения: \blacktriangledown — 30 кэВ, $T < 60$ °С, $t \sim 30$ мин; \bullet — 20 кэВ, $T < 60$ °С, $t \sim 6$ мин; \blacklozenge — 10 кэВ, $T < 60$ °С, $t \sim 6$ мин

Имеющиеся на сегодня данные по полировке поверхности оптических материалов говорят о возможности уменьшения шероховатости поверхности путем оптимизации параметров ионного облучения вплоть до 0,1 нм [6, 7, 9].

Заключение

Обработка оптических деталей из ситалла с начальной шероховатостью $R_a = 0,9 - 1,2$ нм пучком ионов аргона с энергиями 10—30 кэВ показала, что при скользящем облучении образцов на его поверхности формируется волнообразный рельеф с характеристической длиной волны от 30 до 100 нм в зависимости от условий облучения.

Азимутальное вращение и нагрев облучаемой мишени приводят к подавлению развития волнообразной структуры на поверхности и дают эффект полировки.

Выбор условий ионно-лучевой обработки может позволить проводить ионную полировку оптических деталей приборов, уменьшая исходную шероховатость поверхности вплоть до 0,1 нм.

Литература

1. Carter G. // J. Phys. D: Applied Phys. 2001. V. 34. P. R1.
2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. / Под ред. Р. Бериша. Вып. II. — М.: Мир, 1986.
3. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: Сб. статей 1986—1987 гг. / Сост. Е. С. Машкова. — М.: Мир, 1989.
4. Bradley R. M., Harper J. M. E. // J. Vac. Sci. Technol. 1988. V. A 6(4). P. 2390.
5. Chan W. L., Chason E. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 121301.
6. Vollner J., Ziberi B., Frost F., Rauschenbach B. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2009. V. 1181. P. DD13-15.
7. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Vollner J., Flamm D., Schindler A. // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. V. 21. P. 224026.
8. Mashkova E. S., Molchanov V. A. Medium-energy ion reflection from solids. — Amsterdam: North-Holland, 1985.
9. Frost F., Ziberi B., Fechner R., Cornejo M., Vollner J., Schindler A., Rauschenbach B. // Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2009): Матер. 19-й Межд. конф. 21—25 августа 2009 г. — М.: МАТИ, 2009. Т. 1. С. 195.
10. Vollner J., Ziberi B., Frost F., Rauschenbach B. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 043501.

Ion-beam polishing study of the surfaces of optical device components

N. N. Andrianova, A. M. Borisov, V. V. Borovskaya, E. S. Mashkova
Institute of Nuclear Physics, Moscow State University.
1/2 Leninsky gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: es_mashkova@mail.ru

The results of experimental study of the ion-beam treatment process with the view of polishing the optical glass-ceramics surfaces have been presented. Ion irradiation has been produced by 10—30 keV Ar⁺ ions. Developed surface topography has been studied using FemtoScan. It is shown that the azimuthal rotation of the irradiated sample suppresses the wave structure (ripples) and gives the effect of polishing — surface roughness is decreased from initial level $R_a \sim 1$ nm till 0.5 nm.

PACS: 07.60-j, 42.70.-a

Keywords: optical glass-ceramics, sputtering, ion polishing, surface relief.

Bibliography — 10 references.

Received September 22, 2011