

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ КВАРЦА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УГЛА НАКЛОНА ИОННОГО ПУЧКА

Ходяков И.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Трапашко Г.А. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе исследована зависимость скорости ионно-лучевого травления кварцевой подложки от угла падения ионного пучка при фиксированных параметрах обработки. Эксперимент проводился с использованием ионного пучка с аргоном в качестве рабочего газа, энергией 1000 эВ и шириной 8 мм. На поверхности образца сформированы локальные области травления при углах падения в диапазоне от 0° до 40° при постоянном времени воздействия 300 с для каждой точки. Установлено, что с увеличением угла наклона ионного пучка наблюдается рост глубины травления, достигающий двукратного увеличения по сравнению с нормальным падением. Результаты работы могут быть использованы при оптимизации процессов ионно-лучевой полировки оптических элементов.

Ключевые слова. ионно-лучевое травление, ионно-лучевая полировка, кварц, угол падения, скорость травления, коэффициент распыления, оптические элементы, обработка поверхности

Введение. Корректировка формы и качества поверхности оптических элементов, является одной из ключевых задач прецизионной оптики и приборостроения. Повышение требований к точности оптических систем, применяемых в лазерной технике, микроэлектронике и сенсорных устройствах, обуславливает необходимость получения поверхностей с нанометровой шероховатостью и минимальными дефектами. Традиционные методы механической обработки, такие как шлифование и полирование, не всегда обеспечивают требуемую точность и могут приводить к появлению микродефектов и повреждений поверхностного слоя [1]. В связи с этим всё более широкое применение находят методы ионно-лучевой обработки. Данные методы обеспечивают высокую степень гладкости поверхности, вплоть до субнанометровых значений шероховатости, и эффективно устраняют дефекты, возникающие после традиционной обработки [1].

Физическая основа ионно-лучевой полировки связана с процессами взаимодействия ускоренных ионов с атомами твёрдого тела. При попадании иона в материал происходит передача энергии атомам мишени, что приводит к каскаду столкновений и выбиванию атомов с поверхности. Практическая значимость ионно-лучевой полировки проявляется при обработке кварцевых подложек и оптических элементов, где требуется высокая точность формы и минимальные поверхностные дефекты. Однако в процессе обработки могут возникать нежелательные эффекты, такие как перераспыление материала, образование дефектов и изменение структуры поверхности, что требует детального исследования закономерностей процесса [2].

Особое значение для процессов ионно-лучевой обработки имеет угол падения ионного пучка. Известно, что коэффициент распыления и скорость травления существенно зависят от этого параметра: при наклонном падении ионов увеличивается вероятность передачи импульса поверхностным атомам, что приводит к росту скорости удаления материала [3].

Дополнительные особенности процесса связаны с типом используемых ионов. При использовании молекулярных ионов наблюдается их распад на атомы при взаимодействии с поверхностью, что приводит к изменению распределения энергии и глубины проникновения в материал. Это, в свою очередь, влияет на характер формирования дефектов и эффективность распыления [4].

Анализ современных исследований показывает, что процессы ионно-лучевого травления и полировки определяются сложным взаимодействием параметров пучка (энергии, угла падения, состава ионов) и свойств материала. Несмотря на значительное количество работ, остаётся актуальной задача установления закономерностей изменения скорости травления в зависимости от угла наклона ионного пучка, особенно для кварцевых материалов, широко используемых в оптических системах.

Целью данной работы является исследование закономерностей изменения скорости ионно-лучевого травления кварца при варьировании угла наклона ионного пучка, а также

анализ влияния данного параметра на качество поверхности при корректировке формы линз методом ионно-лучевой полировки.

Основная часть. Исследование зависимости скорости ионно-лучевого травления от угла падения ионов проводилось на кварцевых подложках с использованием метода ионно-лучевой обработки.

Ионный пучок формировался с использованием аргона в качестве рабочего газа. Обработка осуществлялась с использованием ионного источника, формирующего пучок с энергией ионов 1000 эВ. Ширина ионного пучка составляла 8 мм, что обеспечивало локализованное воздействие на поверхность образца и формирование отдельных зон травления. Время воздействия ионного пучка составляла 300 с в каждой точке.

Для исследования угловой зависимости скорости травления на поверхности кварцевой подложки были сформированы локальные области обработки в виде углублений. Формирование данных областей осуществлялось при различных углах падения ионного пучка относительно нормали к поверхности. Угол наклона пучка варьировался в диапазоне от 0° до 40°.

В ходе эксперимента было сформировано девять отдельных углублений, соответствующих различным значениям угла падения (рис. 1). Все остальные параметры обработки, включая энергию ионного пучка и геометрию воздействия, поддерживались постоянными, что обеспечивало возможность корректного сопоставления результатов. Контроль полученных данных происходил на интерферометре.

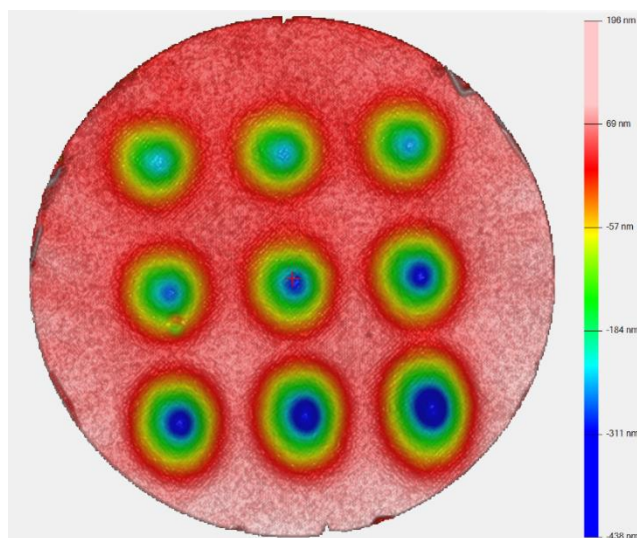


Рисунок 1 – Интерферограмма поверхности кварцевой подложки с локальными областями обработки в виде углублений при различных углах падения ионного пучка

После завершения обработки проводилось измерение глубины сформированных углублений. Полученные значения использовались для оценки интенсивности удаления материала при различных углах падения ионов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – результаты измерения глубины травления кварцевой подложки при различных углах падения ионного пучка

Угол наклона пучка, град.	Глубина травления, нм
0	239,27
5	270,10
10	286,29
15	289,01
20	334,19
25	369,33
30	399,21
35	437,09
40	480,97

С увеличением угла наклона пучка наблюдается устойчивый рост глубины сформированных углублений. В исследуемом диапазоне углов глубина травления увеличивается приблизительно в два раза. Полученная зависимость свидетельствует о повышении эффективности ионного распыления при увеличении угла падения ионов. Это

обусловлено изменением характера передачи энергии в приповерхностном слое. При наклонном падении возрастает вероятность передачи импульса поверхностным атомам, что приводит к увеличению коэффициента распыления. В случае нормального падения часть энергии ионов рассеивается в глубине материала, снижая эффективность удаления вещества.

Заключение. Экспериментально установлено, что с увеличением угла наклона ионного пучка в диапазоне от 0° до 40° наблюдается устойчивый рост скорости травления. Максимальная глубина составляет 480.968 нм, что примерно в два раза превышает значение, полученное при нормальном падении ионов. Это свидетельствует о существенном увеличении эффективности удаления материала при наклонном падении пучка. В исследуемом диапазоне углов реализуется возрастающий участок зависимости скорости травления от угла падения, что согласуется с современными представлениями о механизмах ионно-лучевого травления [1].

Установленные зависимости могут применяться для ограничения угла наклона ионного пучка при обработке линз с большой кривизной поверхности, что позволяет обеспечить требуемую равномерность травления и повысить качество формируемой поверхности.

Список литературы

1. Ion polishing of fused silica by low-energy ion beams / N. I. Chkhalo, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko [et al.] // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 22. – P. 6191–6198.
2. Angle-dependent ion beam etching of RuAl thin films for structuring GHz-frequency electronics / S. Hampel, R. Voigtländer, T. König [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2024. – Vol. 35. – Art. 204.
3. Molecular ion induced surface amorphization of silicon: a comparative study using molecular dynamics simulations / M. Schmidt, M. Emmert, M. Seibt // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2017. – Vol. 411. – P. 119–126.
4. Molecular dynamics simulation of ion beam polishing of silicon surface / Y. Xiao, H. Wu, J. Li [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 546. – Art. 149094.

UDC 621.3

ANGLE DEPENDENCE OF ION BEAM ETCHING RATE OF QUARTZ SUBSTRATES FOR OPTICAL SURFACE CORRECTION

Khodiakov I.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Trapashko G.A. – Cand. Of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. This work investigates the dependence of the ion beam etching rate of quartz substrates on the ion incidence angle under fixed processing conditions. The experiment was carried out using an argon ion beam with an energy of 1000 eV and a beam width of 8 mm. Local etching areas were formed on the sample surface at incidence angles ranging from 0° to 40° , with a constant irradiation time of 300 s for each point. It was found that the etching depth increases with increasing ion incidence angle, with the maximum value being approximately twice as high as that at normal incidence. The observed behavior is attributed to the enhanced energy transfer to near-surface atoms at oblique ion incidence, leading to an increase in sputtering efficiency. The results confirm that the ion incidence angle is a key parameter governing the ion beam etching process. The obtained data can be used for optimization of ion beam polishing processes in optical applications, particularly for limiting the incidence angle during the correction of lenses with high surface curvature.

Keywords: ion beam etching, ion beam polishing, quartz substrate, ion incidence angle, sputtering yield, etching rate, optical elements, surface correction