

УДК 623.454.255.2

Влияние режима ионной обработки на плотность дефектов и разрушение поверхности астроситалла

Духопельников Д.В.¹, Ивахненко С.Г.^{1,*},
Воробьев Е.В.¹, Азербайев А.А.²

[*ivakhnenko@bmsturu](mailto:ivakhnenko@bmsturu)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Лыткаринский завод оптического стекла, Лыткарино, Россия

Показано, что при воздействии ионных пучков высокой интенсивности, помимо распыления, происходит разрушение поверхности оптического ситалла, которое проявляется возникновением дефектов в виде сколов и отслоений материала. Исследовано влияние плотности ионного тока и плотности мощности ионного пучка на плотность дефектов, образующихся на поверхности. Показано, что при постоянной плотности мощности повышение энергии ионов вызывает снижение плотности дефектов. При этом существует пороговая плотность мощности, при которой дефекты образуются. В качестве ионного источника использовался ускоритель с анодным слоем, работающий на аргоне. Компенсация ионного пучка осуществлялась на остаточном газе.

Ключевые слова: ионный источник, ионно-лучевая обработка, оптический ситалл, астроситалл, разрушение поверхности

Введение

В последнее время значительно возросли требования к физическим, механическим и оптическим свойствам применяемых для изготовления оптических деталей материалов. Так, самое распространенное стекло марки К8, оказалось непригодно для изготовления зеркал телескопов космического базирования и производства элементов оптических гироскопов, так как для решения таких задач необходимо минимизировать температурный коэффициент линейного расширения оптических материалов. В результате, на смену традиционным маркам аморфного стекла в оптическую промышленность пришли стеклокристаллические материалы, ситаллы. Наибольшее распространение получили материал СО-115М (астроситалл) и его зарубежный аналог Zerodur [1]. Эти материалы являются ситаллами сподуменового состава [2], в основе которых лежит стекло системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Благодаря присутствию в составе фаз с положительным и отрицательным коэффи-

циентом расширения, суммарный температурный коэффициент линейного расширения материала близок к нулю.

Помимо требований к характеристикам материала, растут и требования к качеству и точности обработки рабочих поверхностей оптических деталей. Необходимая точность обработки достигает $\lambda/100$ (где λ – длина волны используемого излучения), а шероховатость – 0,1 нм (RMS) и ниже [3, 4]. Для достижения таких параметров после всех стадий механической обработки оптические детали обрабатывают направленными пучками ускоренных тяжелых частиц, чаще всего ионами аргона [5]. В результате ионной бомбардировки с поверхности образца удаляется слой нужной толщины, а шероховатость сглаживается.

Ионно-лучевому формообразованию и полировке поверхностей оптических деталей посвящено большое количество публикаций [6, 7, 8]. Благодаря ионно-лучевой обработке (ИЛО) удастся снизить шероховатость большинства применяемых в оптике материалов до значений 0,2 нм (RMS) и ниже. В тоже время, во многих работах отмечается, что, в отличие от других оптических материалов, при обработке астроситалла шероховатость поверхности возрастает. Отмечено даже значительное, видимое невооруженным взглядом замутнение поверхности астроситалла после обработки ионами аргона с энергией 1000 эВ [9]. Однако, больше упоминаний о значительных повреждениях поверхности оптических деталей из ситалла в результате воздействия ионных потоков в литературе не встречается. В тоже время, во всех работах, посвященных ИЛО оптических изделий, для достижения заданной формы применялось непрерывное сканирование ионного пучка по поверхности образца [10, 11]. В результате, средняя плотность мощности на обрабатываемой поверхности, оказывалась значительно меньше плотности мощности в ионном пучке. Определению пороговых характеристик ионного пучка, при которых начинается интенсивное разрушение поверхности астроситалла, а также причинам такого разрушения, внимание в литературе не уделяется.

Целью настоящей работы является исследование влияния режима ионной на плотность дефектов, образующихся в результате обработки поверхности образца, изготовленного из астроситалла СО-115М.

1. Методика эксперимента

Эксперименты по воздействию ионного потока на поверхность астроситалла проводились на установке с вакуумной камерой диаметром 700 мм и длиной 700 мм. Камера откачивалась турбомолекулярным насосом Oerlikon Leybold Vacuum TURBOVAC MAG W 3200 СТ производительностью 3200 л/с. Давление в вакуумной камере измерялось инверсно-магнетронным вакуумметром MKS Instruments 972 DualMag. Остаточное давление в вакуумной камере во всех экспериментах не превышало $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

В качестве ионного источника использовался ускоритель с анодным слоем УАС100К [12]. Ускоритель оснащен системой компенсации азимутального поворота ионов в ускорительном канале и коническими полюсными наконечниками [13, 14]. В результате, обес-

печивается фокусировка ионного пучка в пятно с гауссовым распределением плотности ионного тока по радиусу. Фокальная плоскость расположена на расстоянии 400 мм от выхода из ускорительного канала. Ускоритель работал без катода-компенсатора, компенсация ионного пучка осуществлялась за счет ионизации остаточной атмосферы [15]. В качестве рабочего вещества использовался аргон, который подавался в ускоритель через регулятор расхода газа MKS Instruments 2179А.

Схема экспериментов показана на рисунке 1. Обрабатываемый образец устанавливался на металлическом держателе на расстоянии 400 мм от ионного источника так, что поверхность образца совпадала с фокальной плоскостью ионного пучка. Обработка производилась через круглую диафрагму диаметром 40 мм. Ток разряда контролировался при помощи настольного цифрового мультиметра Tektronix DMM4050. Исследование поверхности астроситалла после ионной обработки производилось при помощи лазерного сканирующего конфокального микроскопа CarlZeiss LSM700.

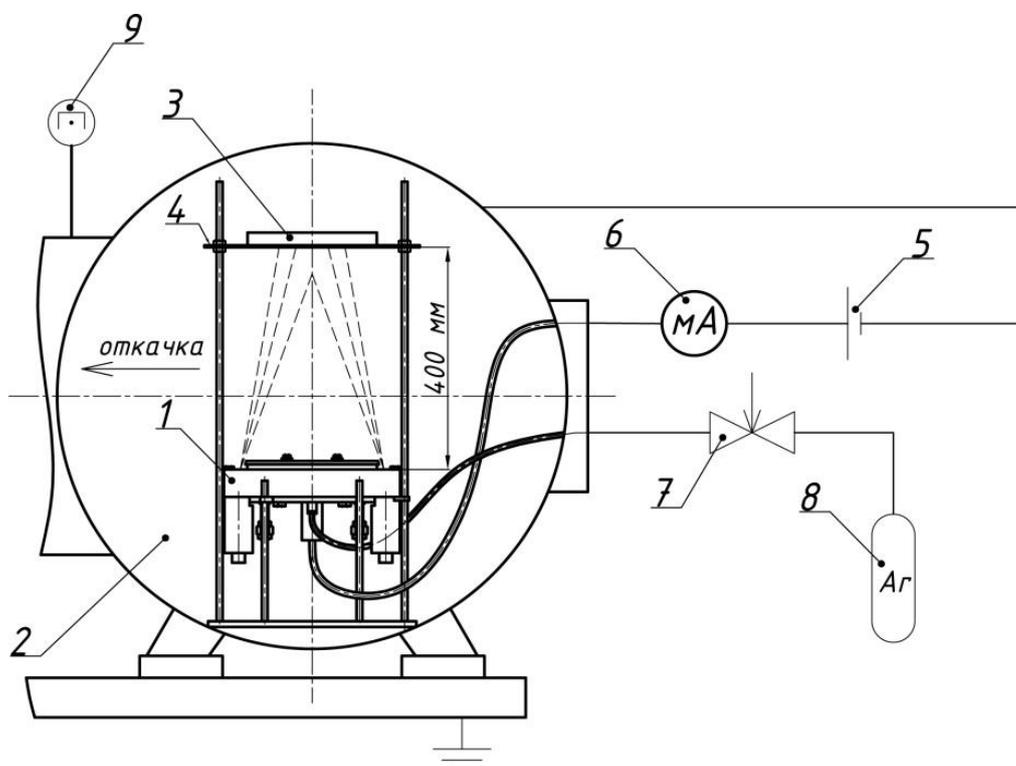


Рис. 1. Схема экспериментов:

1 – ускоритель ИИ-100К; 2 – вакуумная камера; 3 – исследуемый образец; 4 – держатель с диафрагмой; 5 – источник питания ускорителя; 6 – миллиамперметр; 7 – регулятор расхода газа; 8 – баллон с аргонем; 9 – вакуумметр

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Режимы работы ионного источника, при которых проводились эксперименты, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы работы ионного источника при проведении экспериментов.

Напряжение разряда, В	Ток разряда, мА	Время обработки, мин	Давление в камере, Па
2000	110	30	$2,00 \cdot 10^{-2}$
3000	110	30	$1,86 \cdot 10^{-2}$
3800	50	30	$8,65 \cdot 10^{-3}$

В результате длительной обработки астроситалла сфокусированным ионным пучком при работе ускорителя на всех режимах наблюдалось интенсивное разрушение поверхности. Форма дефектов (рис. 2.) позволяет сделать вывод о том, что они образовывались, в результате отшелушивания с поверхности небольшого участка материала.

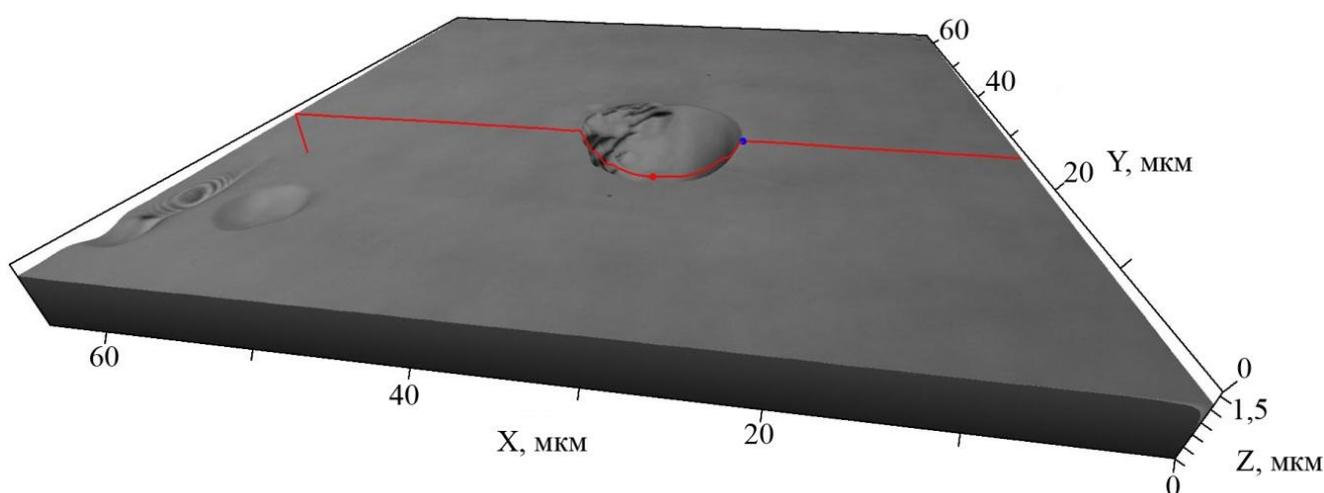


Рис. 2. Трехмерное изображение дефекта на поверхности астроситалла после ионной обработки

В качестве меры для оценки разрушения поверхности использовалась поверхностная плотность дефектов $k = S_d/S$, определяемая как отношение суммарной площади дефектов S_d на рассматриваемом участке к общей площади участка S . Для определения этой величины при помощи микроскопа был сделан набор фотографий обработанной поверхности (рис. 3а) на разных расстояниях от оси ионного пучка. Затем в графическом редакторе фотографии были обработаны так, чтобы все дефекты были закрашены черным, а чистая поверхность – белым цветом (рис. 3б). Фотографии снимались при одинаковых значениях выдержки, диафрагмы и яркости лампы подсветки микроскопа с использованием одного объектива, разрешение составляло 2,72 мкм. При обработке полученных изображений использовались одни и те же инструменты с одинаковыми настройками. Величина k определялась как отношение количества черных пикселей к суммарному количеству пикселей на кадре. Из полученных результатов вычиталась средняя поверхностная плотность дефектов на необработанной поверхности образца (рис. 3в), вычисленная аналогичным методом.

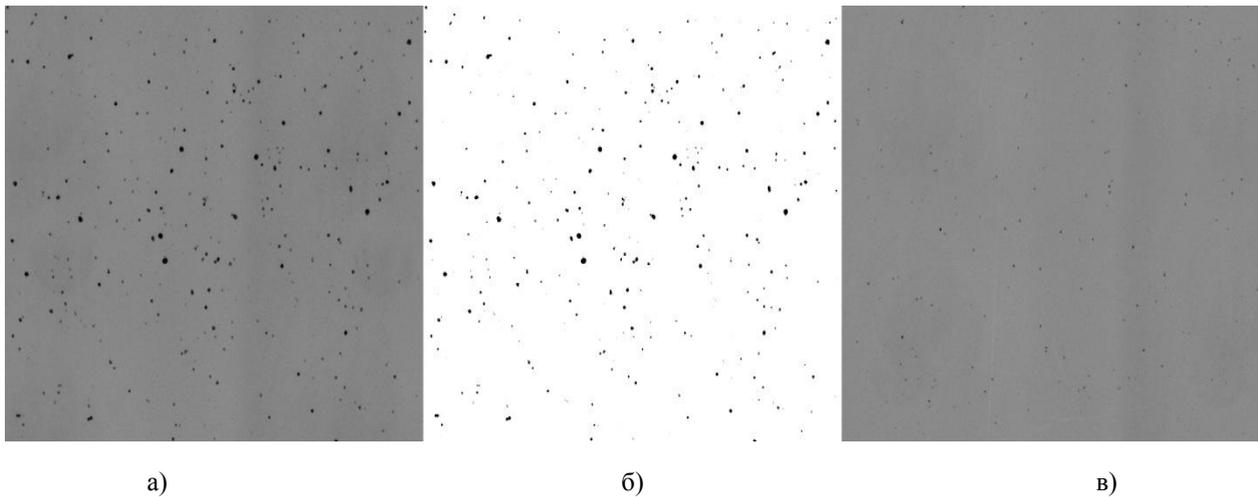


Рис. 3. Фотография поверхности обработанной ионным пучком до осветления (а), осветленная фотография (б) и фотография необработанной поверхности (в)

Полученные зависимости величины k от расстояния до оси ионного пучка при разных режимах обработки показаны на рисунке 4. На графики также нанесены зависимости распределения плотности ионного тока по радиусу пучка на поверхности образца, измеренные при помощи зонда Фарадея. Видно, что распределения плотности дефектов соответствуют распределению плотности ионного тока для каждого режима обработки. В центре пучка, где плотность тока максимальна, поверхность наиболее разрушена, а ближе к периферии плотность дефектов снижается при снижении плотности тока.

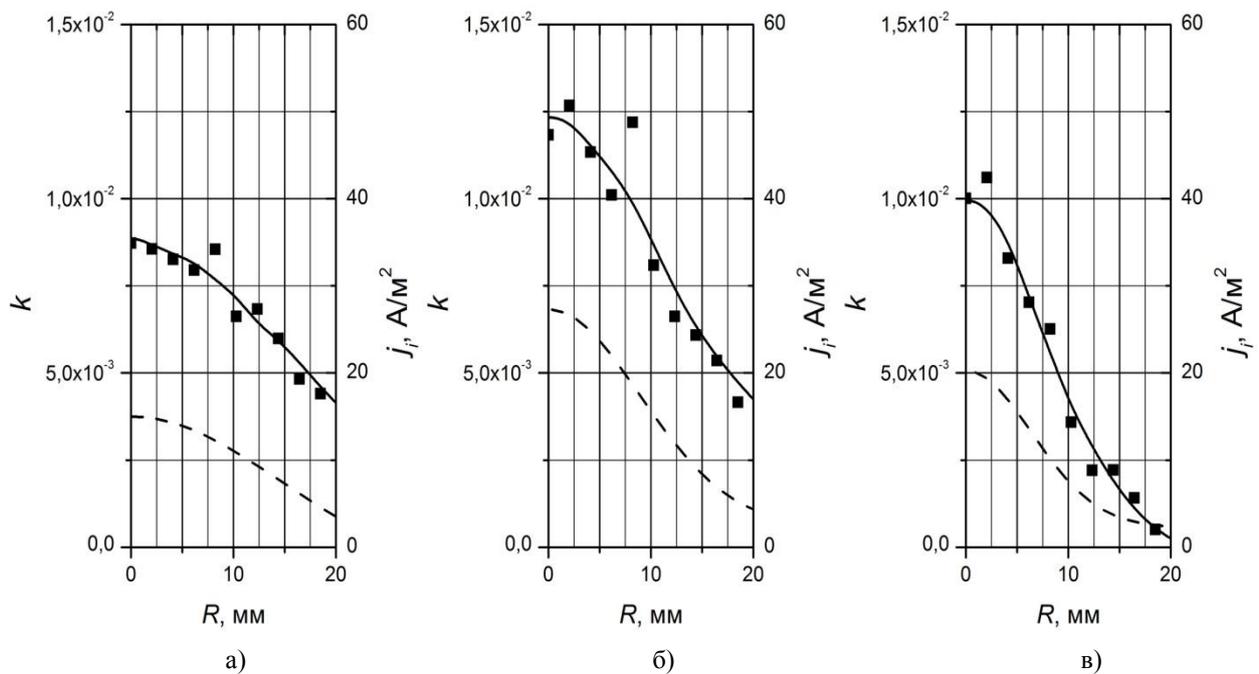


Рис. 4. Зависимость доли дефектов k (сплошные линии) и плотности ионного тока (пунктирные линии) от расстояния до оси пучка R после обработки поверхности: (а) – $U_p = 2$ кВ, $I_p = 110$ мА; (б) – $U_p = 3$ кВ, $I_p = 110$ мА; (в) – $U_p = 3,8$ кВ, $I_p = 50$ мА

Однако, при одной и той же плотности ионного тока интенсивности ионной обработки поверхности при разных режимах отличаются. Это связано тем, что при увеличении напряжения разряда увеличивается средняя энергия ионов. Поэтому для оценки влияния режима обработки на плотность дефектов удобно использовать плотность мощности $q(R)$, вкладываемой в поверхность образца. Средняя энергия ионов в пучке использованного ускорителя $\varepsilon_i \approx 0,7U_i$, (U_i – напряжение разряда). Тогда плотность мощности на поверхности выражается по формуле:

$$q(R) = \frac{dP(R)}{dS} = \frac{d(I_i \varepsilon_i)}{dS} = j_i(R) \cdot \varepsilon_i$$

где R – расстояния от оси пучка.

Зависимости плотности дефектов k от плотности мощности q при различных режимах обработки представлены на рисунке 5.

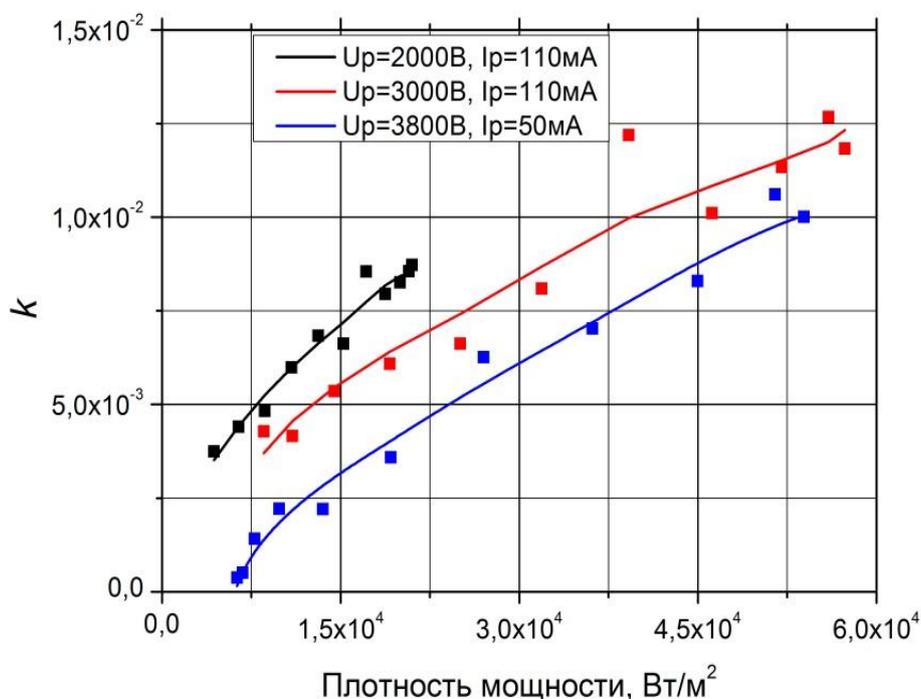


Рис. 5. Зависимость поверхностной плотности дефектов k от плотности мощности на поверхности образца при различных режимах работы ионного источника

Плотность дефектов на поверхности астроситалла растет при увеличении плотности мощности ионного пучка при всех режимах обработки. При постоянной плотности мощности ионного пучка увеличение энергии ионов приводит к снижению количества и плотности дефектов. При этом количество дефектов зависит от напряжения разряда ионного источника и, соответственно, от энергии ионов: при повышении напряжения дефектов становится меньше. Этот эффект может быть связан с накоплением электрического заряда на обрабатываемой поверхности так как снижение энергии ионов при постоянной плотности мощности приводит к увеличению плотности ионного тока. Из рисунка 5 видно, что

существует пороговая величина плотности мощности, при которой на поверхности образца не происходит образования и развития дефектов. При напряжении разряда 3800 В пороговая плотность мощности составила $6 \cdot 10^3$ Вт/м², что соответствует плотности тока 2,85 А/м². При меньших значениях напряжения разряда пороговые плотности мощности не были достигнуты.

Заключение

Проведенные исследования показали, что плотность дефектов, образующихся на поверхности образца из астроситалла СО-115М в результате длительной ионной бомбардировки, зависит как от плотности мощности, приносимой ионами, так и от их энергии. При одной и той же плотности мощности увеличение ускоряющего напряжения ионного источника приводит к увеличению количества и плотности дефектов. При этом существует пороговая плотность мощности, при которой дефекты на поверхности астроситалла не образуются. Полученные результаты будут полезны при выборе режимов ионно-лучевой обработки при формообразовании оптических деталей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №НК 14-08-31203\14.

Список литературы

1. Абдулкадыров М.А., Аннушкин С.И., Герасимов В.М., Молев В.И., Патрикеев А.П., Румянцев В.В., Самуйлов А.В. Заготовки для астрономической оптики из оптического ситалла СО-115М // Формообразование оптических поверхностей: труды международной академии «Контенант», Российское отделение. Т. 1. М., 2005. С. 105-114.
2. Павлушкин. Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.
3. Мартынов М.И., Михнев Р.А., Семенов А.П., Штандель С.К. Технология и метрология малоразмерной ионно-лучевой обработки оптических деталей // Формообразование оптических поверхностей: труды международной академии «Контенант», Российское отделение. Т. 1. М., 2005. С. 151-170.
4. Arnold T., Bohm G., Fechner R., Meister J., Nickel A., Frost F., Hansel T., Schindler A. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques – status and outlook // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Vol. 616, is. 2-3. P. 147-156. DOI: [10.1016/j.nima.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.013)
5. Виноградов М.И., Маишев Ю.П. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
6. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: fundamentals and applications // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. Vol. 21, no. 22. Art. no. 224026 (20 pp.). DOI: [10.1088/0953-8984/21/22/224026](https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/22/224026)

7. Wilson S.R., Reicher D.W., McNeil J.R. Surface Figuring Using Neutral Ion Beams // Proc. SPIE. Vol. 0966. Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics. 1989. P. 74-81. DOI: [10.1117/12.948051](https://doi.org/10.1117/12.948051)
8. Young-Sik Ghim, Shin-Jae You, Hyug-Gyo Rhee, Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee. Ultra-precision surface polishing using ion beam figuring // Proc. SPIE. Vol. 8416, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. 2012. Art. no. 84161O. DOI: [10.1117/12.973725](https://doi.org/10.1117/12.973725)
9. Allen L.N. Progress in ion figuring large optics // Proc. SPIE. Vol. 2428, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1994. 1995. P. 237-247. DOI: [10.1117/12.213776](https://doi.org/10.1117/12.213776)
10. Ghigo M., Cornelli S., Canestrari R., Garegnani D. Development of a large ion beam figuring facility for correction of optics up to 1.7 m diameter // Proc. SPIE. Vol. 7426, Optical Manufacturing and Testing VIII. 2009. Art. no. 742611. DOI: [10.1117/12.826433](https://doi.org/10.1117/12.826433)
11. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of Ion Beam Figuring // Proc. SPIE. Vol. 6671, Optical Manufacturing and Testing VII. 2007. Art. no. 667114. DOI: [10.1117/12.734273](https://doi.org/10.1117/12.734273)
12. Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. Ионно-плазменные технологии. С. 35-41.
13. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В., Крылов В.И. Влияние азимутального отклонения ионов плазменной струи на тяговый КПД двигателя с анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. С. 219-232. DOI: [10.7463/1212.0483944](https://doi.org/10.7463/1212.0483944)
14. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В. Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 233-238. DOI: [10.7463/1112.0483882](https://doi.org/10.7463/1112.0483882)
15. Духопельников Д.В., Юрченко А.А. Экспериментальное исследование технологического ускорителя "радикал" без катода компенсатора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2004. № 3. С. 74-83.

Influence of the Ion Treatment Regime on Defects Density and Surface Destruction of the Polycrystalline Glass

D.V. Duhopel'nikov¹, S.G. Ivakhnenko^{1,*},
E.V. Vorob'ev, A.A.¹, Azerbaev²

[*ivakhnenko@bmsturu](mailto:ivakhnenko@bmsturu)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Lytkarino Optical Glass Factory, Lytkarino, Russia

Keywords: ion source, ion beam figuring, optical sitall, astronomical sitall, surface destruction

The ion beam technology is used for finish treatment of large-scale optic parts to achieve highest precision and minimal surface roughness. The surface roughness increases during the ion treatment of polycrystalline materials in contrast to usual optic materials. This is caused, first, by polycrystalline structure of material and, second, by micro-defects appearing on its surface. The aim of the work is to investigate the influence of ion processing conditions on the amount of defects formed on the polycrystalline glass CO-115M.

As an ion source, was used the anode layer accelerator with electromagnetically focusing ion beam and with excess charge compensation on the residual gas. The ion accelerator provided Gaussian ion current distribution on the treated sample surface. The accelerator had three operation conditions: 1 – $U_d = 2$ kV, $I_d = 110$ mA; 2 – $U_d = 3$ kV, $I_d = 110$ mA; 3 – $U_d = 3,8$ kV, $I_d = 50$ mA (U_d – discharge voltage, I_d – discharge current). Processing time was 30 min.

For quantitative estimation of surface destruction degree the surface defects density was used which is equal to the ratio of total area of defects within the region under consideration to entire area. Defects area was calculated using the microphotography of treated surface.

The investigations have shown that the defects occurred as microscopic chips in all operation conditions of treatment. The defects density distribution corresponds to ion current distribution on the sample surface. With increasing ion current power density a size of defects has grown and their amount has increased. With the constant power density an increasing acceleration voltage results in decreasing density of defects. It was shown that a process of appearing defects is of the threshold nature. For each accelerated voltage there is a power density at which defects do not appear. The work results may be useful to choose the ion beam processing operation conditions in manufacturing large-scale optics.

References

1. Abdulkadyrov M.A., Annushkin S.I., Gerasimov V.M., Molev V.I., Patrikeev A.P., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V. Blanks for astronomical optics of optical glass-ceramic CO-115M. *Formoobrazovanie opticheskikh poverkhnostey: trudy mezhdunarodnoy akademii "Kontenant", Rossiyskoe otделение. T. 1* [Shaping of optical surfaces: Proceedings of the International Academy "Kontenant", Russian branch. Vol. 1]. Moscow, 2005, pp. 105-114. (in Russian).
2. Pavlushkin. N.M. *Khimicheskaya tekhnologiya stekla i sitallov* [Chemical technology of glass and glass-ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 432 p. (in Russian).
3. Martynov M.I., Mikhnev R.A., Semenov A.P., Shtandel' S.K. Technology and metrology of small ion-beam processing of optical parts. *Formoobrazovanie opticheskikh poverkhnostey: trudy mezhdunarodnoy akademii "Kontenant", Rossiyskoe otделение. T. 1* [Shaping of optical surfaces: Proceedings of the International Academy "Kontenant", Russian branch. Vol. 1]. Moscow, 2005, pp. 151-170. (in Russian).
4. Arnold T., Bohm G., Fechner R., Meister J., Nickel A., Frost F., Hansel T., Schindler A. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques – status and outlook. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, vol. 616, is. 2-3, pp. 147-156. DOI: [10.1016/j.nima.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.013)
5. Vinogradov M.I., Maishev Yu.P. *Vakuumnyye protsessy i oborudovanie ionno- i elektronno-luchevoy tekhnologii* [Vacuum processes and equipment for ion - and electron-beam technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 56 p. (in Russian).
6. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: fundamentals and applications. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2009, vol. 21, no. 22, art. no. 224026 (20 pp.). DOI: [10.1088/0953-8984/21/22/224026](https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/22/224026)
7. Wilson S.R., Reicher D.W., McNeil J.R. Surface Figuring Using Neutral Ion Beams. *Proc. SPIE. Vol. 0966. Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*. 1989, pp. 74-81. DOI: [10.1117/12.948051](https://doi.org/10.1117/12.948051)
8. Young-Sik Ghim, Shin-Jae You, Hyug-Gyo Rhee, Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee. Ultra-precision surface polishing using ion beam figuring. *Proc. SPIE. Vol. 8416, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. 2012. Art. no. 84161O. DOI: [10.1117/12.973725](https://doi.org/10.1117/12.973725)
9. Allen L.N. Progress in ion figuring large optics. *Proc. SPIE. Vol. 2428, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1994*. 1995, pp. 237-247. DOI: [10.1117/12.213776](https://doi.org/10.1117/12.213776)
10. Ghigo M., Cornelli S., Canestrari R., Garegnani D. Development of a large ion beam figuring facility for correction of optics up to 1.7 m diameter. *Proc. SPIE. Vol. 7426, Optical Manufacturing and Testing VIII*. 2009, art. no. 742611. DOI: [10.1117/12.826433](https://doi.org/10.1117/12.826433)

11. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of Ion Beam Figuring. *Proc. SPIE. Vol. 6671, Optical Manufacturing and Testing VII*. 2007, art. no. 667114. DOI: [10.1117/12.734273](https://doi.org/10.1117/12.734273)
12. Vorob'ev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Hall accelerator with a focused beam for nanoscale processing of large-sized mirrors of optical telescopes. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, spec. is. *Ionno-plazmennye tekhnologii* [Ion-plasma technologies], pp. 35-41. (in Russian).
13. Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'ev E.V., Krylov V.I. The influence of the azimuthal deviation ion plasma jet on the traction motor efficiency with anode layer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 12, pp. 219-232. DOI: [10.7463/1212.0483944](https://doi.org/10.7463/1212.0483944) (in Russian).
14. Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'ev E.V. Experimental demonstration of azimuthal ion deviation effect in engines with anode layer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 11, pp. 233-238. DOI: [10.7463/1112.0483882](https://doi.org/10.7463/1112.0483882) (in Russian).
15. Dukhopel'nikov D.V., Yurchenko A.A. Experimental Study of “Radikal” Technological Accelerator with Anode Layer without Cathode Compensator. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2004, no. 3, pp. 74-83. (in Russian).