

УДК 621.7-4+621.793/.795

Исследование влияния плотности ионного тока на образование дефектов на поверхности ситалла при ионно-лучевой обработке

Поздняков В. Г.^{1,*}, Рязанов В. А.¹,
Жуков А. В.¹

* vasilij2107@mail.ru

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

Показано, что при воздействии ионных пучков высокой интенсивности происходит разрушение поверхности астроситалла. Данное разрушение представляет собой дефекты, похожие на сколы и отслоения материала. Исследована зависимость количества и размеров дефектов поверхности от плотности ионного тока при ионно-плазменной обработке. Показано, что при увеличении плотности тока происходит увеличение размеров дефектов, однако, наблюдается снижение их общего количества. Рассмотрено изменение функции распределения дефектов по размерам при изменении плотности ионного тока. В качестве ионного источника использовался ускоритель с анодным слоем с электромагнитной фокусировкой ионного пучка и компенсацией избыточного заряда на остаточном газе.

Ключевые слова: астроситалл, разрушение поверхности, ионно-лучевая обработка

Введение

Благодаря своим уникальным теплофизическим свойствам астроситаллы [1] (стеклокристаллические материалы на основе системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), получили широкое распространение в оптической промышленности. Эти материалы применяют для изготовления оптических деталей самых разных форм и размеров: от главных зеркал больших телескопов, до миниатюрных элементов лазерных гироскопов. Основное преимущество астроситаллов перед традиционными оптическими стеклами заключается в том, что их температурный коэффициент линейного расширения близок к нулю, поэтому они способны работать в условиях сильных перепадов температур, например, высоко в горах, или в космосе.

Развитие современной оптики определяется, прежде всего, точностью изготовления рабочих поверхностей оптических деталей. Например, наибольшие допустимые отклонения формы асферических зеркал телескопов могут достигать $\lambda/100$ (λ – длина волны), а шероховатость поверхности элементов лазерной ультрафиолетовой оптики – не более 0,1 нм (RMS) [2]. Такие параметры невозможно получить при использовании

традиционных механических методов формообразования. Поэтому на последней стадии изготовления оптической детали, применяется ионно-лучевая обработка (ИЛО). В основе этого метода лежит распыление поверхности твердого тела высокоэнергичными ионами тяжелых газов (чаще всего, ионами аргона).

В технологических установках, реализующих метод ИЛО [3, 4, 5], для получения заданной формы поверхности применяется непрерывное сканирование ионного пучка по поверхности заготовки по установленной программе. В результате, при такой обработке усредненная по всей поверхности плотность мощности, приносимой ионами, оказывается значительно меньше плотности мощности в ионном пучке. Время полного цикла ионно-лучевой обработки крупногабаритной детали может достигать нескольких десятков часов. Для снижения временных затрат необходимо повышать плотность мощности ионного пучка.

Однако, ионная обработка поверхности астроситалла при повышении плотности мощности приводит к снижению качества поверхности [6]. Одной из причин снижения качества является увеличение шероховатости из-за неравномерности скорости ионного распыления различно ориентированных кристаллитов материала. Другая причина снижения качества заключается в появлении на поверхности астроситалла микроскопических дефектов, внешне напоминающих сколы [7]. После интенсивной ионной обработки обнаружены. Показано, что количество дефектов растет с ростом плотности мощности ионного пучка, причем процесс образования дефектов носит пороговый характер: при низких интенсивностях пучка качество поверхности не ухудшается. Было отмечено, что размеры дефектов зависят от плотности мощности ионного потока, однако детальной оценки этого влияния сделано не было.

Целью настоящей работы является исследование распределения поверхностной плотности дефектов в виде сколов по размерам, в зависимости от плотности ионного тока.

1. Оборудование и методика эксперимента

Объектом исследования служила круглая пластина из оптического ситалла марки СО-115М (рис. 1) диаметром 180 мм и толщиной 25 мм. В качестве ионного источника применялся ускоритель с анодным слоем и фокусированным ионным пучком УАС-100К. В отличие от ускорителей с замкнутым электронным дрейфом традиционной конструкции [8], УАС-100К, благодаря компенсации азимутального смещения ионов в канале [9, 10, 11] и конической форме полюсных наконечников, создает ионный пучок с гауссовым распределением плотности тока по радиусу. Ускоритель работал на аргоне. Компенсация избыточного положительного заряда ионного пучка происходила за счет вторичной эмиссии со стенок вакуумной камеры и оснастки, а также за счет ионизации остаточного газа.

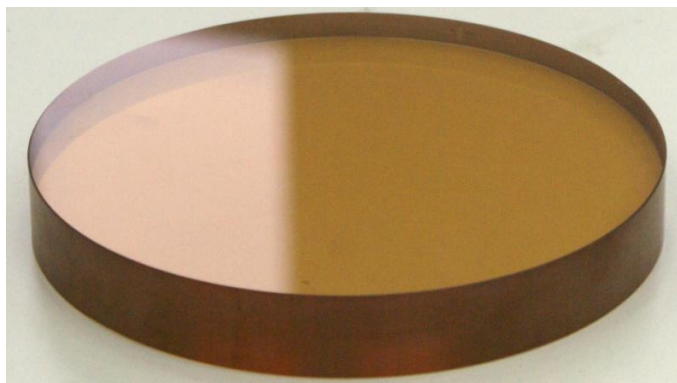


Рис. 1. Фотография исследуемого образца

Ионный источник располагался внутри цилиндрической вакуумной камеры, откачка которой осуществлялась турбомолекулярным насосом Oerlikon Leybold Vacuum TURBOVAC MAG W 3200 СТ производительностью 3200 л/с. Ионный пучок ускорителя был направлен вертикально. Образец устанавливался над ускорителем на расстоянии 400 мм от него (рис. 2). Для исключения влияния медленных ионов с периферийных областей ионного пучка, травление производилось через круглую диафрагму диаметром 40 мм.

Обработка поверхности образца производилась при напряжении разряда 3800 В и токе 50 мА в течении 30 мин. Максимальная плотность ионного тока на поверхности образца составляла $20,2 \text{ А/м}^2$, а плотность мощности – $5,4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

Исследование распределения поверхностной плотности дефектов по размерам производилось при помощи лазерного сканирующего конфокального микроскопа CarlZeiss LSM 700. Применение методов конфокальной микроскопии позволило достичь высокого разрешения и существенно увеличить контрастность получаемых изображений, что особенно важно при изучении прозрачных и полупрозрачных объектов.

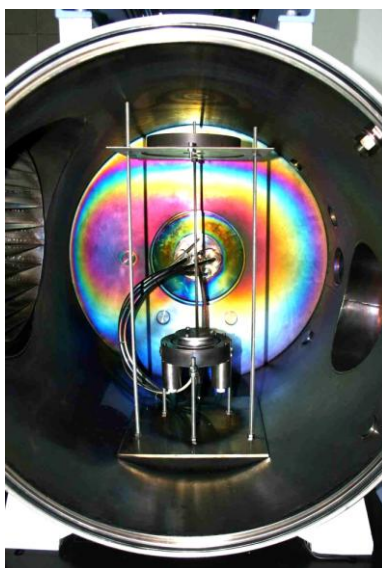


Рис. 2. Фотография ионного источника и образца в вакуумной камере

2. Результаты экспериментов

Ионная обработка образца привела к образованию большого количества поверхностных дефектов. Дефекты представляют собой лунки, у которых латеральные размеры значительно превышают глубину, что позволяет сделать вывод о том, что они образовались в результате отшелушивания с поверхности небольшого участка материала. Латеральные размеры дефектов находятся в пределах от 1 мкм до 30 мкм, глубина – от 0,2 мкм до 3 мкм. В качестве количественной меры измерения размеров дефектов была принята величина, равная среднему арифметическому минимального и максимального поперечных размеров.

Измерение распределения дефектов по размерам производилось в трех областях обработанной поверхности, соответствующих разным плотностям ионного тока (рис. 3).

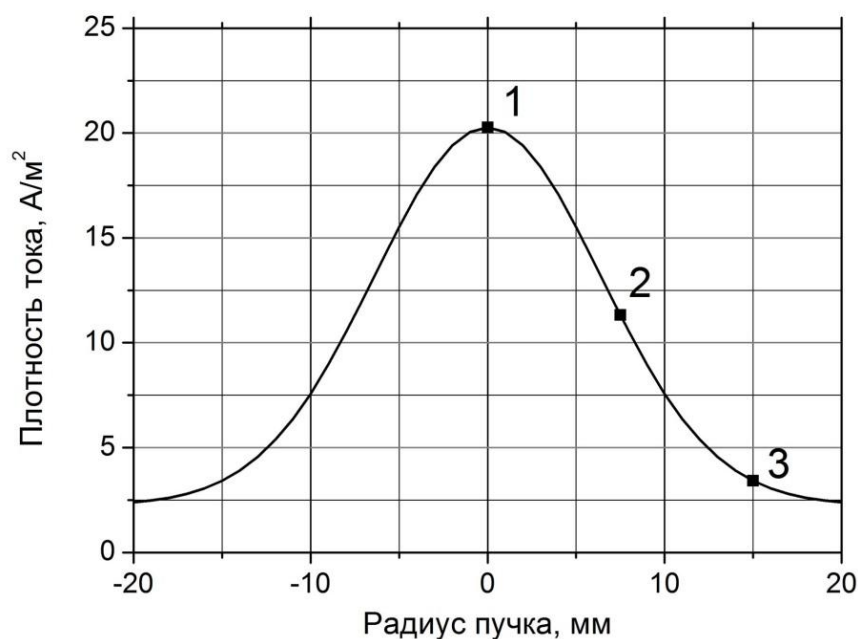


Рис. 3. Распределение плотности ионного тока по радиусу ионного пучка

В каждой области были произвольно выбраны по четыре участка размерами 1280 x 1280 мкм. Все участки фотографировались при помощи микроскопа CarZeiss LSM 700. Затем при помощи программного обеспечения микроскопа на каждой фотографии были измерены латеральные размеры всех попавших в поле зрения дефектов. В отличие от работы [7], в которой в качестве меры поверхностной плотности дефектов было принято отношение суммарной площади дефектов рассматриваемом участке к общей площади участка, в данной работе плотность дефектов определяется их количеством на единицу площади.

Для исследования распределения поверхностной плотности дефектов по их размерам промежутки между максимальным и минимальным значениями размеров дефектов в каждой области был разделен на равные интервалы величиной 0.3 мкм. Плотность

дефектов в каждом интервале определялась как отношение числа дефектов с размерами, попадающими в данный интервал, к площади всей исследуемой области.

На необработанной поверхности исследуемого образца также было обнаружено небольшое количество дефектов. Визуально отличить дефекты, образовавшиеся в результате ионной обработки, от тех, что были на поверхности нового образца затруднительно. Поэтому перед началом экспериментов по приведенной методике было измерено распределение этих дефектов по размерам. Затем, для каждой из обработанных областей плотность дефектов определялась разностью полной плотности дефектов и плотности дефектов на необработанной области для каждого интервала размеров. Данные по количеству, размерам и средней плотности дефектов в каждой исследованной области представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество измеренных дефектов в исследованных областях поверхности образца

Область	Количество дефектов	Средняя плотность дефектов, $1/\text{мм}^2$	Минимальный размер дефекта, мкм	Максимальный размер дефекта, мкм	Средний размер дефекта, мкм
1	505	77.0	1.30	25.8	6.7
2	619	94.4	1.17	22.8	5.1
3	628	95.8	0.95	16.2	4.0

На рисунках 4 – 6 представлены распределения поверхностной плотности дефектов по их размерам в трех исследованных областях.

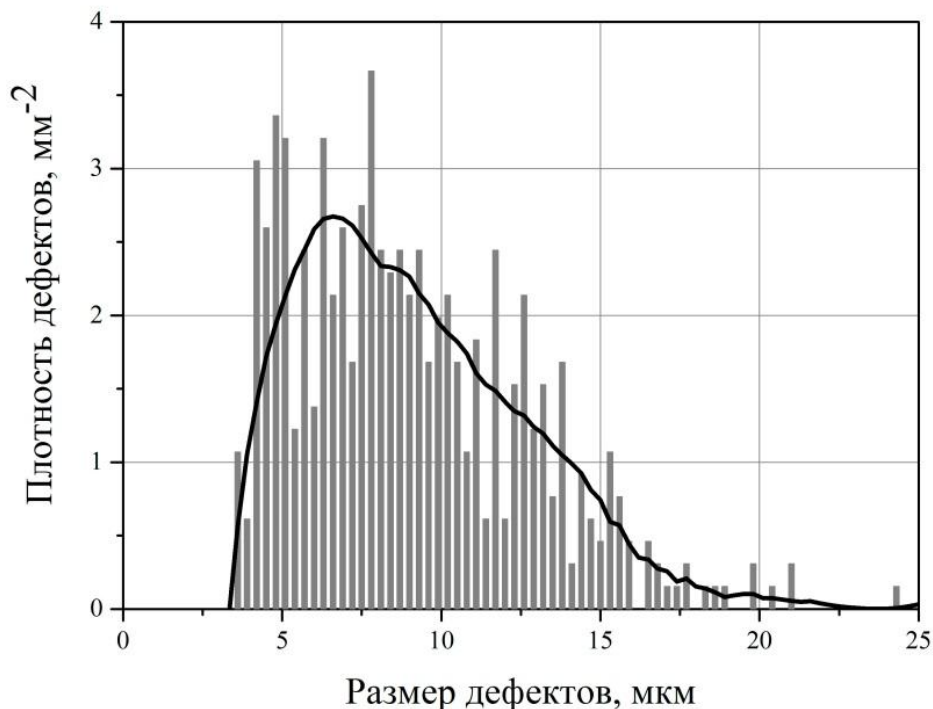


Рис. 4. Распределение плотности дефектов в зависимости от их размера, область 1 (плотность ионного тока 20.2 А/м^2)

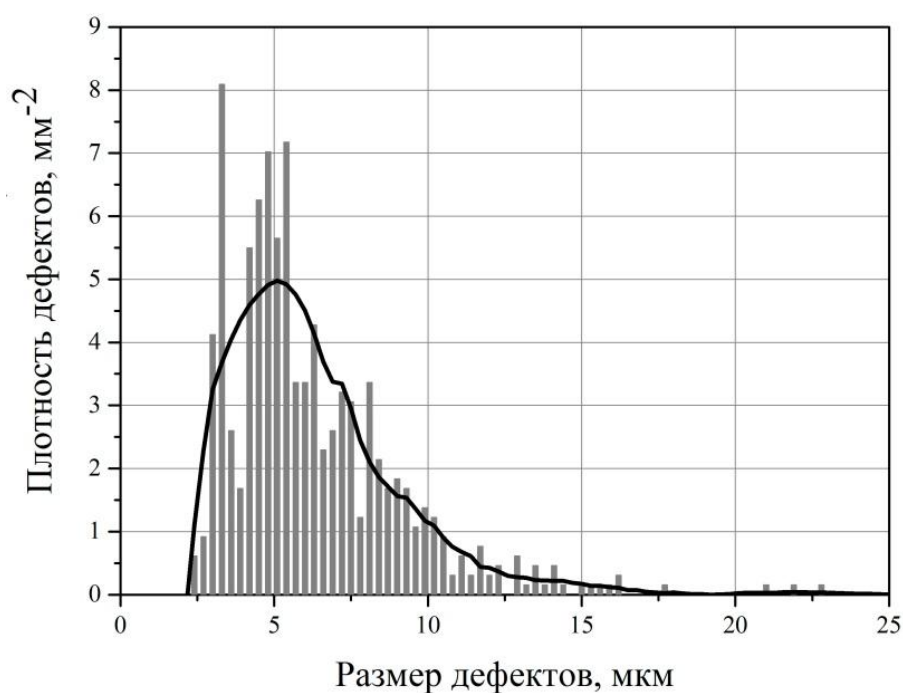


Рис. 5. Распределение плотности дефектов в зависимости от их размера, область 2 (плотность ионного тока 11.3 A/m^2)

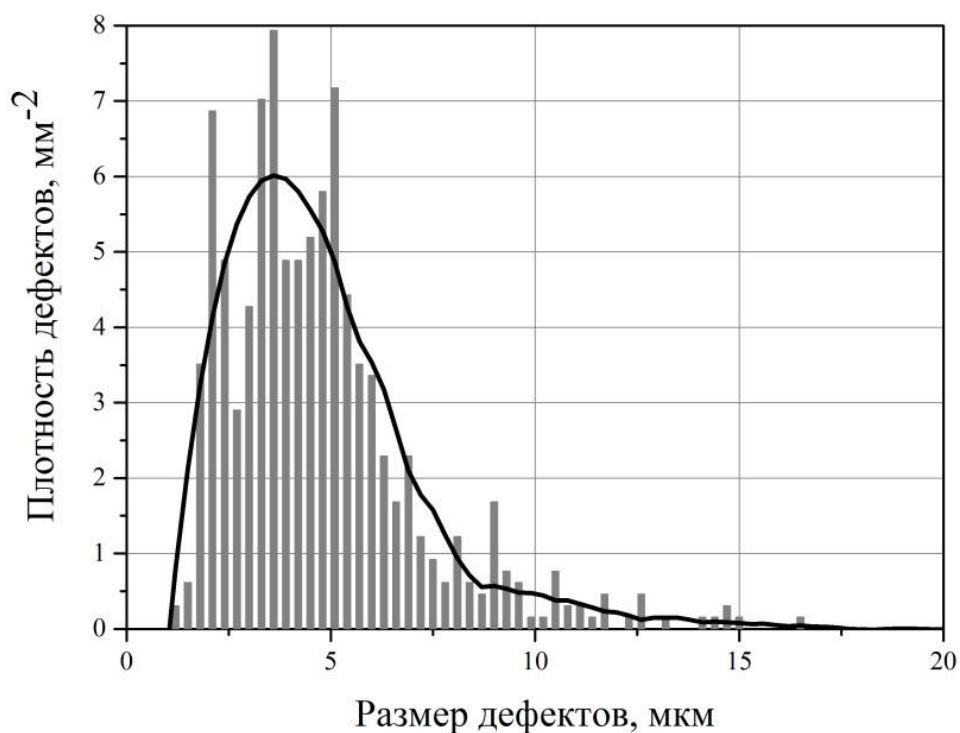


Рис. 6. Распределение плотности дефектов в зависимости от их размера, область 3 (плотность ионного тока 3.4 A/m^2)

Для сравнения результатов, полученных в различных точках, была проведена аппроксимация результатов измерений и все три зависимости представлены на одном графике (рис. 7).

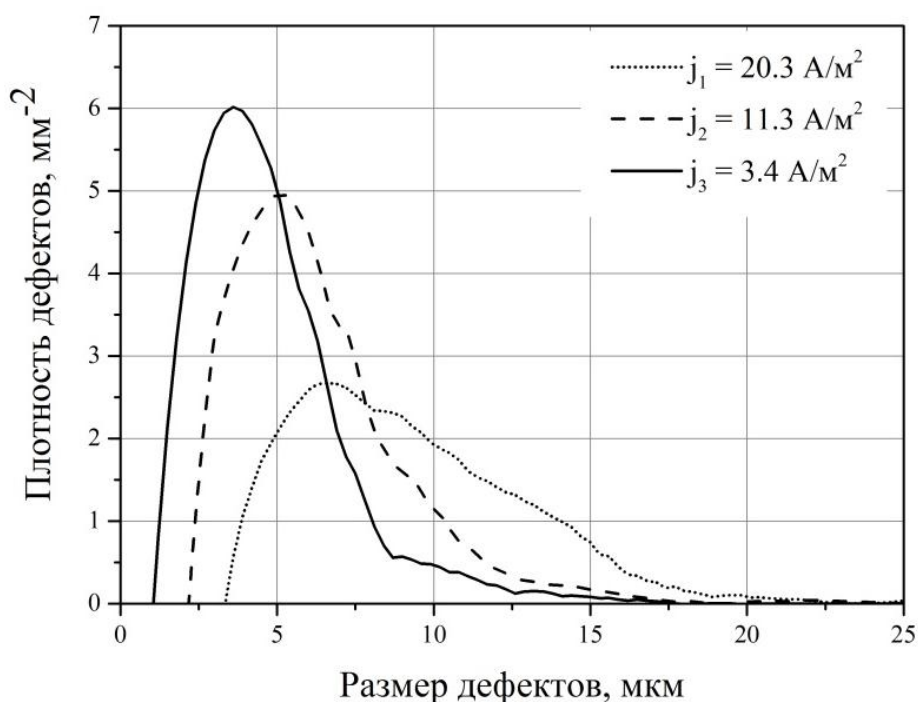


Рис. 7. Распределение плотности дефектов в зависимости от их размера в разных областях ионного пучка

Полученные результаты показывают, что при увеличении плотности ионного тока снижается плотность дефектов на поверхности астроситалла. При этом наблюдается изменение вида функции распределения плотности дефектов по размерам: плотность маленьких дефектов снижается, а плотность больших – увеличивается. Также с ростом плотности ионного тока наблюдается увеличение размеров дефектов: при увеличении плотности ионного тока в 6 раз, средний размер дефектов увеличился в 1.6 раза.

Заключение

Размеры и количество дефектов, образующихся на поверхности астроситалла в результате ионной обработки, зависят от плотности ионного тока. При низких плотностях тока наблюдается большое количество небольших дефектов. При росте плотности тока, размеры дефектов растут, однако, при этом наблюдается снижение их общего количества.

При разработке технологических процессов ионно-лучевой обработки рабочих поверхностей оптических изделий необходимо учитывать длину волны излучения, для работы с которым предназначено изделие. Чем больше длина волны по сравнению с размерами дефектов, тем меньшее влияние они оказывают на характеристики прибора. Поэтому при изготовлении оптических изделий, работающих в инфракрасном диапазоне, можно применять высокоинтенсивную ионно-лучевую обработку. В тоже время, для изделий, предназначенных для работы в видимом, или ультрафиолетовом диапазонах дефекты поверхности могут привести к значительному рассеянию излучения, поэтому при их обработке необходимо снижать интенсивность ионного пучка, или использовать

режимы, вовсе не приводящие к образованию дефектов [7]. Но использование таких режимов приведет к значительному увеличению длительности процесса обработки изделия.

Приведенные результаты будут полезны для прогнозирования степени разрушения поверхности оптических деталей из астроситалла при ионно-лучевом формообразовании, а также для определения допустимых плотностей мощности ионного пучка в процессе обработки.

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

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: тр. международной академии «Контенант», Российское отделение. Т. 2. М., 2005. С. 105-114.
2. 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. A 616, iss. 2-3. P. 147-156. DOI: [10.1016/j.nima.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.013)
3. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: fundamentals and applications // Journal of Physics: Condensed Matter. 2009. Vol. 21, no. 22. Art. no. 224026. DOI: [10.1088/0953-8984/21/22/224026](https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/22/224026)
4. Wilson S.R., Reicher D.W., McNeil J.R. Surface Figuring Using Neutral Ion Beams // 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)
5. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of Ion Beam Figuring // SPIE Vol. 6671. Optical Manufacturing and Testing VII. 2007. Art. no. 667114. DOI: [10.1117/12.734273](https://doi.org/10.1117/12.734273)
6. Wenlin Liao, Yifan Dai, Xuhui Xie, Lin Zhou. Microscopic morphology evolution during ion beam smoothing of Zerodur surfaces // Optics Express. 2014. Vol. 22, no. 1. P. 377-386. DOI: [10.1364/OE.22.000377](https://doi.org/10.1364/OE.22.000377)
7. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В., Азербайев А.А. Влияние режима ионной обработки на плотность дефектов и разрушение поверхности астроситалла // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 181-191. DOI: [10.7463/1214.0748236](https://doi.org/10.7463/1214.0748236)
8. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200 // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.

Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа:

<http://www.technomag.edu.ru/doc/230165.html> (дата обращения 01.05.2015).

9. 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.
10. 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)
11. 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)

Research of the Ion Current Density Influence on the Glass-Ceramics Surface Defects Forming under Ion-Beam Processing

V.G. Pozdnyakov^{1,*}, V.A. Ryazanov¹,
A.V. Zhukov¹

[*vasilij2107@mail.ru](mailto:vasilij2107@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: astrositall, surface destruction, ion beam treatment

Development of modern optics is primarily determined by manufacturing accuracy of the working surfaces of optical parts. Therefore, at the last stage of manufacturing optical parts the ion-beam treatment is applied. This method uses spraying the high-energy ions of heavy gases on the surface of a solid body. After an intense ion treatment there are microscopic defects, resembling chips, on the surface of polycrystalline glass. The aim of this work is to study distribution of the surface density of defects by sizes, depending on the density of ion current.

Accelerator with an anode layer and a focused ion beam was used as an ion source. The accelerator worked on argon and created ion beam with Gaussian distribution of current density along the radius. The excess positive charge of the ion beam was compensated owing to ionization of residual gas. To eliminate the influence of slow ions with peripheral regions of the ion beam, the etching was performed through a circular aperture with a diameter of 40 mm.

Surface treatment of the sample was carried out at the discharge voltage of 3800 V and current of 50 mA for 30 min. The maximum ion current density on the sample surface was 20.2 A/m² and a power density was of 5.4·10⁴ W/m².

Distribution of defects by size was measured in three areas of the treated surface corresponding to different densities of ion current, namely: 20.2 A/m², 11.3 A/m², and 3.4 A/m². Their number per area unit defines a density of defects.

The results show that with increasing ion current density the density of defects on the surface of polycrystalline glass decreases. Thus a view of distribution function of defect density according to size is changed: density of small defects is reduced, and density of large ones increases. Also with increasing ion current density is observed an increase in the size of defects: a 6 times increase of the average size of defects results in 1.6 times increasing ion current density.

These data will be useful to predict the degree of polycrystalline glass surface destruction during ion-beam treatment, as well as to determine the minimum allowable power densities of the ion beam.

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. 2* [Shaping of optical surfaces: Proceedings of the International Academy "Kontenant", Russian branch. Vol. 2]. Moscow, 2005, pp. 105-114. (in Russian).
2. 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. A 616, iss. 2-3, pp. 147-156. DOI: [10.1016/j.nima.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.013)
3. Frost F., Fechner R., Ziberi B., Völlner J., Flamm D., Schindler A. Large area smoothing of surfaces by ion bombardment: fundamentals and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 22, art. no. 224026. DOI: [10.1088/0953-8984/21/22/224026](https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/22/224026)
4. Wilson S.R., Reicher D.W., McNeil J.R. Surface Figuring Using Neutral Ion Beams. *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)
5. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of Ion Beam Figuring. *SPIE Vol. 6671. Optical Manufacturing and Testing VII*, 2007, art. no. 667114. DOI: [10.1117/12.734273](https://doi.org/10.1117/12.734273)
6. Wenlin Liao, Yifan Dai, Xuhui Xie, Lin Zhou. Microscopic morphology evolution during ion beam smoothing of Zerodur surfaces. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 377-386. DOI: [10.1364/OE.22.000377](https://doi.org/10.1364/OE.22.000377)
7. Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'ev E.V., Azerbaev A.A. Influence of the Ion Treatment Regime on Defects Density and Surface Destruction of the Polycrystalline Glass. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 181-191. DOI: [10.7463/1214.0748236](https://doi.org/10.7463/1214.0748236) (in Russian).
8. Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G. The investigation optimization of the characteristics of ion source IS-200. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 10. Available at: <http://www.technomag.edu.ru/doc/230165.html>, accessed 01.05.2015. (in Russian).
9. 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).
10. 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).
11. 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).