



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30>

УДК 539.25; 533.9.082.5

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТКИ В ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ АРГОНА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖЕК И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА

К. Т. ЛОГУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Исследовано влияние параметров очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на морфологию поверхности стеклянных подложек и характеристики ее оптического эмиссионного спектра. Очистка проводилась в диапазоне мощности высокочастотного источника от 100 до 2000 Вт длительностью до 150 с. Морфология поверхности анализировалась методом атомно-силовой микроскопии, а диагностика плазмы обеспечивалась методом оптической эмиссионной спектроскопии. Установлено, что параметры очистки при мощности разряда 300 Вт и длительности 60 с обеспечивают минимальную шероховатость и удаление загрязнений без повреждения поверхности. Спектральный анализ выявил рост интенсивности атомных линий аргона с увеличением мощности и расхода газа, что отражает рост плотности возбужденных частиц и температуры электронов. Полученные зависимости могут быть использованы для автоматизированного контроля и регулировки режимов плазменной очистки в технологических процессах.

Ключевые слова: очистка поверхности, высокоплотная индуктивно-связанная плазма, морфология поверхности, атомно-силовая микроскопия, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Автор выражает благодарность Д. А. Котову и Д. Б. Мигасу за ценные рекомендации и замечания в процессе работы над статьей, а также В. А. Лапицкой и О. М. Чернаусик за проведение исследований методом атомно-силовой микроскопии.

Для цитирования. Логунов, К. Т. Влияние параметров очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию поверхности стеклянных подложек и характеристики эмиссионного спектра / К. Т. Логунов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 24–30. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30>.

THE INFLUENCE OF CLEANING PARAMETERS IN HIGH-DENSITY ARGON PLASMA ON THE SURFACE MORPHOLOGY OF GLASS SUBSTRATES AND THE CHARACTERISTICS OF THE EMISSION SPECTRUM

KONSTANTIN T. LOGUNOV

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

Abstract. The influence of cleaning parameters in high-density inductively coupled argon plasma on the surface morphology of glass substrates and the characteristics of their optical emission spectrum was studied. Cleaning was performed with RF source power ranging from 100 to 2000 W and durations of up to 150 s. Surface morphology was analyzed using atomic force microscopy, and plasma diagnostics were provided by optical emission spectroscopy. It was established that cleaning parameters at a discharge power of 300 W and duration of 60 s ensure minimal surface roughness and contaminant removal without surface damage. Spectral analysis revealed an increase in the intensity of argon atomic lines with increasing power and gas flow rate, reflecting an increase

in excited particle density and electron temperature. The obtained dependencies can be used for automated monitoring and adjustment of plasma cleaning regimes in technological processes.

Keywords: surface cleaning, high-density inductively coupled plasma, surface morphology, atomic force microscopy, optical emission spectroscopy.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

Gratitude. The author expresses gratitude to D. A. Kotov and D. B. Migas for valuable recommendations and comments during the work on the article, as well as to V. A. Lapitskaya and O. M. Chernausik for conducting research using atomic force microscopy.

For citation. Logunov K. T. (2025) The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Surface Morphology of Glass Substrates and the Characteristics of the Emission Spectrum. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 24–30. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30> (in Russian).

Введение

Качество подготовки поверхности подложек является критическим фактором в технологиях модификации поверхности и формирования функциональных покрытий и слоев. Ключевые задачи данного этапа – удаление загрязнений с рабочей стороны подложки и модификация ее морфологии для управления адгезионными свойствами. Для этой цели традиционно применяются химические (влажное травление, органические растворители) и физические (механическая обработка, ультразвук) методы [1, 2], однако им присущ ряд недостатков: риск повторного загрязнения, неоднородность обработки и ограниченная эффективность против стойких загрязнений. В связи с этим методы плазменной и ионно-лучевой очистки привлекают особое внимание, поскольку обеспечивают высокую степень очистки, прецизионное воздействие на структуру поверхности и тонкую настройку параметров, что делает их одним из наиболее эффективных решений для высокотехнологичных производств [3–6].

Учитывая вышеизложенное, следует отметить важность исследований методов плазменной очистки и их влияния на формируемые пленки. В качестве объекта для такого исследования в статье рассмотрены стеклянные подложки. Их очистка проводилась в высокоплотной индуктивно-связанной плазме (ICP) при пониженном давлении. Выбор стеклянных подложек обусловлен их высокой популярностью благодаря низкой стоимости и простоте в обращении. К недостаткам подложек из стекла следует отнести малую теплопроводность, что не позволяет применять их при повышенном нагреве [2]. Также нужно отметить, что плазменная очистка часто считается ограниченно применимой для очистки стекла, поскольку оно будет накапливать заряд и со временем препятствовать дальнейшей очистке [2].

Для точной настройки параметров очистки важно контролировать характеристики плазмы. Одним из наиболее информативных и неразрушающих методов диагностики плазмы является оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС), позволяющая анализировать качественные и количественные параметры плазмы по ее спектральному излучению в режиме реального времени. Метод ОЭС основан на регистрации и интерпретации атомных и молекулярных спектральных линий, возникающих при переходах возбужденных частиц плазмы на более низкие энергетические уровни. Этот подход обеспечивает определение ключевых характеристик, таких как температура электронов, плотность заряженных и нейтральных частиц, состав плазмы, а также идентификацию активных форм в виде радикалов и ионов. В статье представлены результаты исследования режимов очистки в высокоплотной плазме методом ОЭС, устанавливающие корреляцию между параметрами разряда и спектральными особенностями, что необходимо для оптимизации практического использования плазмы.

Проведение эксперимента

Для проведения исследований в качестве подложек были выбраны квадраты из оптического стекла K8, использующегося в оптических фильтрах и элементах оптических систем. Сторона квадрата составляла 20 мм, а толщина подложки – 0,7 мм. Для оценки значимости влияния очистки на свойства подложек из стекла проводилась очистка методом высокоплотной ICP в вакуумной камере.

Очистка подложек из оптического стекла происходила в экспериментальном комплексе на основе модифицированной ВУ-1БСп. Первоначально система была откачана до базового давления порядка $8 \cdot 10^{-3}$ Па. При проведении исследований расстояние источник–подложка составляло 110 мм, частота питающего напряжения – 13,56 МГц. Для определения влияния режимов очистки на стеклянную подложку применялись следующие режимы работы: мощность высокочастотного (ВЧ) источника варьировалась в диапазоне 100–2000 Вт, время обработки – от 0 до 5 мин, расход газа аргона (Ar) составлял от 2,29 до 4,78 л/ч.

Анализ изменений морфологии поверхности выполнялся методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Сканирование проводилось на площади $10 \times 10 \text{ мкм}^2$. Для исследований была выбрана область в центре образцов. Полученные изображения анализировались с использованием специализированного программного обеспечения для расчета параметров шероховатости, включая среднеарифметическое отклонение высот R_a , среднеквадратическое отклонение R_q , среднюю шероховатость по 10-ти точкам R_z , а также визуализацию 3D-рельефа.

Для исследований высокоплотной ICP использовался спектрометр SOL Instruments S150-2-3648USB, который позволяет регистрировать эмиссионные спектры для последующего анализа. Измерения проводились в перпендикулярно исследуемой плазме со спектральным разрешением $<0,15$ нм в диапазоне от 200 до 980 нм. Идентификация спектральных линий осуществлялась с использованием базы данных Atomic Spectra Database (NIST) [7].

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние очистки в высокоплотной плазме было исследовано при помощи АСМ. На рис. 1 представлены снимки морфологии поверхности подложек из стекла до и после обработки. На рис. 1, *a* видно исходное состояние поверхности стеклянной подложки до обработки плазмой, для которой значения шероховатости составили $R_a = 0,717 \text{ нм}$, $R_q = 1,00 \text{ нм}$ и $R_z = 1,88 \text{ нм}$. На рис. 1, *b* представлено изображение после 60 с очистки при мощности разряда 300 Вт и расходе газа 3,23 л/ч.

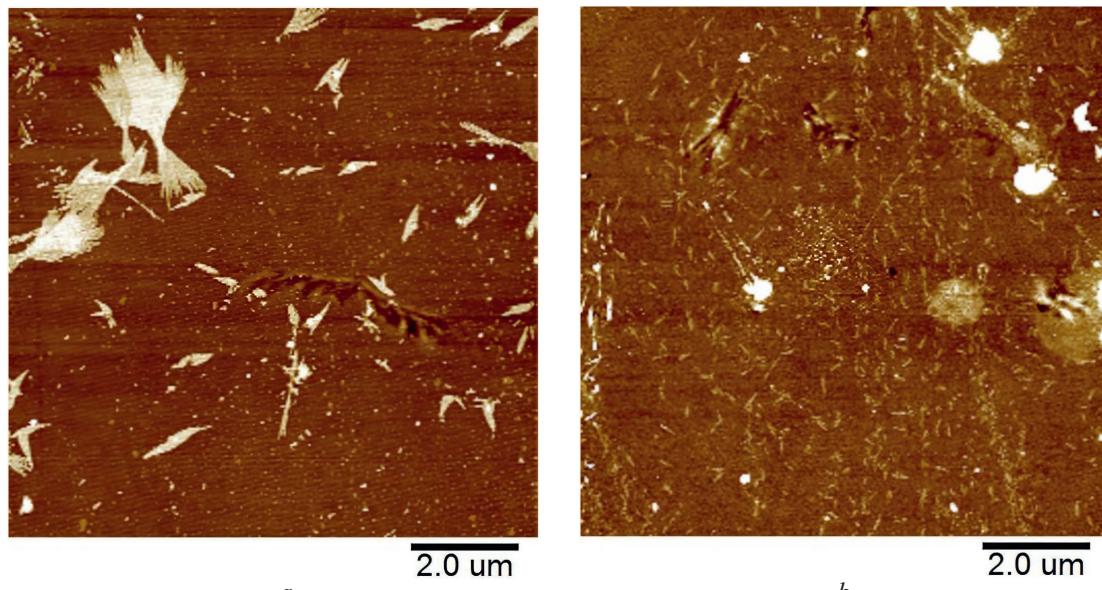


Рис. 1. Снимки морфологии поверхности стеклянных подложек, исследованных с помощью атомно-силовой микроскопии:

a – до обработки; *b* – после очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона длительностью 60 с

Fig. 1. Surface morphology images of glass substrates examined with the help of atomic force microscopy:
a – before treatment; *b* – after cleaning in high-density inductively coupled argon plasma for 60 s

На рис. 2, *a* приведены зависимости R_a , R_q и R_z от времени очистки в высокоплотной ICP аргона. Измерения проводились при мощности ВЧ-источника 300 Вт. На рис. 2, *b* изображены зависимости данных шероховатостей от мощности разряда, полученные при длительности очистки 1 мин.

Исходя из представленных на рис. 2, *a* результатов, можно сделать вывод, что при длительности обработки до 60 с влияние плазмы на шероховатость поверхности минимально. При дальнейшем увеличении времени (более 60 с) наблюдается рост всех параметров шероховатости, что может быть связано с повреждением изначальной поверхности подложки из оптического стекла. Кроме того, R_z имеет минимальное значение при длительности очистки 60 с, что говорит об устраниении большей части поверхностных загрязнений без затрагивания морфологии поверхности самого стекла.

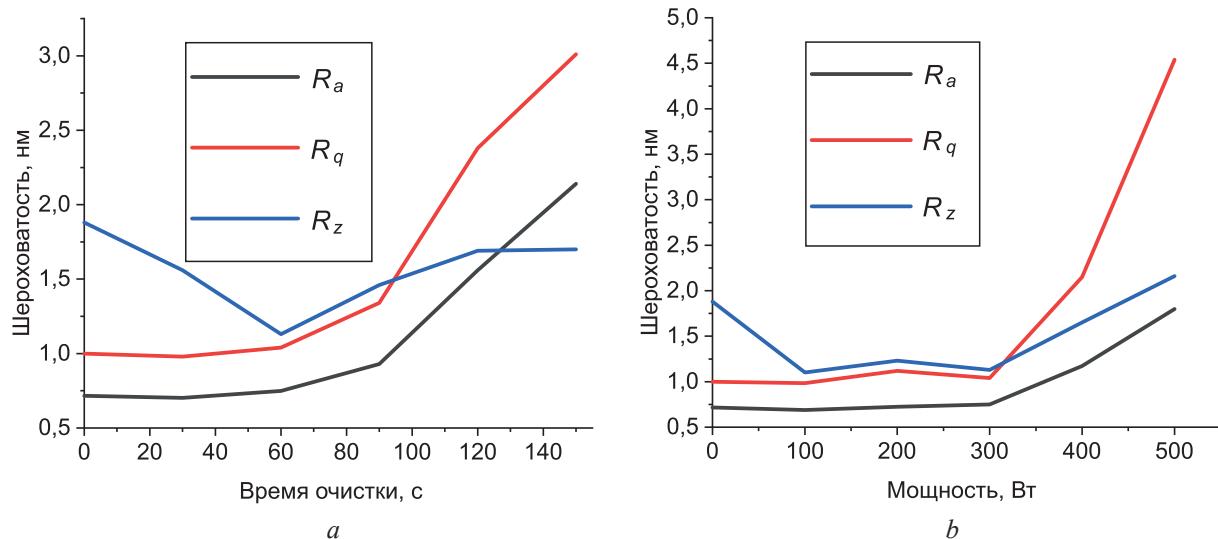


Рис. 2. Зависимость шероховатости подложки из стекла от: *a* – времени очистки; *b* – мощности высокочастотного источника высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона

Fig. 2. Glass substrate roughness as a function of: *a* – cleaning time; *b* – power of a high-frequency source of high-density inductively coupled argon plasma

Исследование зависимости шероховатости от мощности ВЧ-разряда показало, что при мощности до 300 Вт не наблюдается значительного влияния на шероховатость, за исключением R_z . Влияние очистки на показатель R_z существенно отличается для изначальной подложки и подложки после очистки при мощностях 100–300 Вт, что опять же может указывать на устраниние большей части поверхностных загрязнений без затрагивания морфологии поверхности самого стекла. При увеличении мощности разряда параметры шероховатости начинают увеличиваться, особенно резко растет R_q , что указывает на усиление воздействия плазмы и возможное начало микроповреждений самой поверхности. Из полученных данных можно сделать вывод об эффективности очистки длительностью 60 с при мощности ВЧ-источника 300 Вт для обработки поверхности перед нанесением ультратонких пленок. Однако для более толстых пленок начальная шероховатость уже не будет иметь столь сильного влияния, и возможно использование более длительных режимов с большей мощностью.

Для определения корреляции между режимами очистки в высокоплотной ICP и наблюдаемыми изменениями в морфологии поверхности стекла было проведено исследование параметров плазмы при помощи ОЭС. На рис. 3 представлены эмиссионные спектры высокоплотной ICP аргона, зарегистрированные при различных режимах мощности ВЧ-источника: 300 Вт (черная линия) и 2000 Вт (красная линия). Спектральный анализ выявил значительное увеличение интенсивности множества атомных линий Ar при росте мощности с 300 до 2000 Вт, что свидетельствует об интенсификации процессов возбуждения и ионизации в плазме. Наиболее интенсивная линия наблюдается на длине волны $\lambda \approx 811,53$ нм и соответствует переходу $\text{Ar I } 3p^54p \rightarrow 3p^54s$. Учитывая ее высокую интенсивность и стабильное присутствие во всем исследуемом диапазоне параметров, данная линия была выбрана в качестве контрольной для последующего анализа влияния мощности ВЧ-источника и расхода газа на характеристики плазмы.

Сравнение полученных эмиссионных спектров показывает, что при увеличении мощности возрастает как общее число наблюдаемых линий, так и их интенсивность. Все доминирующие пики располагаются в диапазоне от 700 до 850 нм, что соответствует электронным переходам возбужденного атомарного аргона (Ar I).

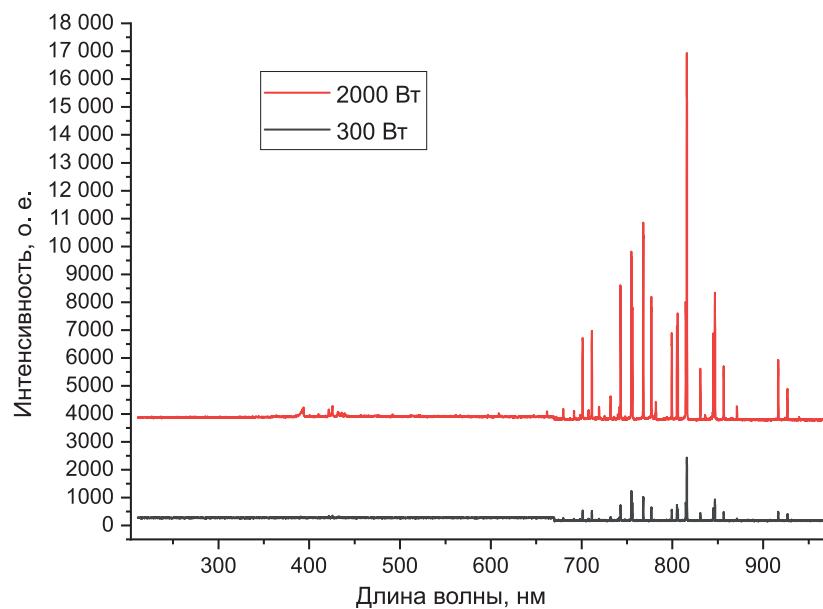


Рис. 3. Сравнение оптических эмиссионных спектров высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона при мощности разряда 300 Вт и 2000 Вт

Fig. 3. Comparison of optical emission spectra of high-density inductively coupled argon plasma at a discharge power of 300 W and 2000 W

При 2000 Вт интенсивность линий увеличивается в 6–7,5 раза по сравнению с режимом 300 Вт, что свидетельствует о значительном росте плотности возбужденных частиц. Кроме того, на эмиссионном спектре большей мощности проявляются дополнительные линии в области 210–700 нм, отсутствующие или плохо различимые на эмиссионном спектре низкой мощности. Увеличение числа спектральных линий и их интенсивности указывает на повышение температуры электронов (T_e), их концентрации (n_e) и возможное увеличение степени ионизации в разряде. Это позволяет объяснить эффективное удаление поверхностных загрязнений со стеклянной подложки на начальном этапе обработки в высокоплотной ICP аргона. При увеличении мощности увеличивается и комбинированное воздействие компонентов плазмы, энергии которых превышают пороговые значения для десорбции и разрушения типичных адсорбатов [7–9]. Таким образом, на начальных этапах обработки происходит преимущественно удаление слабосвязанных молекул и примесей без повреждения подложки. Однако при превышении пороговых энергий (более 20–25 эВ) возможна деструкция поверхности – особенно в областях с дефектами или высокой концентрацией напряжений. Это объясняет рост параметров шероховатости R_a , R_q , R_z при длительности обработки более 60 с и мощности более 300 Вт, как показано на рис. 1. Полученные данные подтверждают, что изменение мощности существенно влияет на энергетические характеристики плазмы.

На рис. 4 представлены полученные зависимости интенсивности одной из основных наблюдаемых линий аргона Ar I ($\lambda = 811,53$ нм) от мощности разряда (*a*) при расходе Ar = 3,53 л/ч и расхода газа (*b*) при мощности ВЧ-источника 1000 Вт. Зависимость на рис. 4, *a* имеет монотонный, близкий к линейному характер в области до ~1000 Вт. При дальнейшем увеличении мощности (>1200 Вт) темп роста интенсивности несколько замедляется, что может быть связано с насыщением степени возбуждения или перераспределением энергии в плазме. Рост интенсивности линии с увеличением мощности разряда указывает на повышение плотности возбужденных атомов Ar, а также может служить косвенным признаком роста T_e . На рис. 4, *b* показано изменение интенсивности линии излучения аргона с длиной волны 811,53 нм в зависимости от расхода рабочего газа (Ar) при постоянной мощности ВЧ-источника 1000 Вт. При увеличении расхода газа от ~2,29 до ~4,79 л/ч наблюдается плавный рост интенсивности, что связано с увеличением числа атомов аргона в зоне разряда и, соответственно, числа возбужденных состояний. В диапазоне 4,34–4,79 л/ч интенсивность возрастает резко, почти в 1,5 раза, что может быть связано с достижением эффективного расхода газа. Локальные флуктуации, наблюдавшиеся во всем измеряемом диапазоне, могут быть вызваны неустойчивостью потока или колебаниями плотности плазмы.

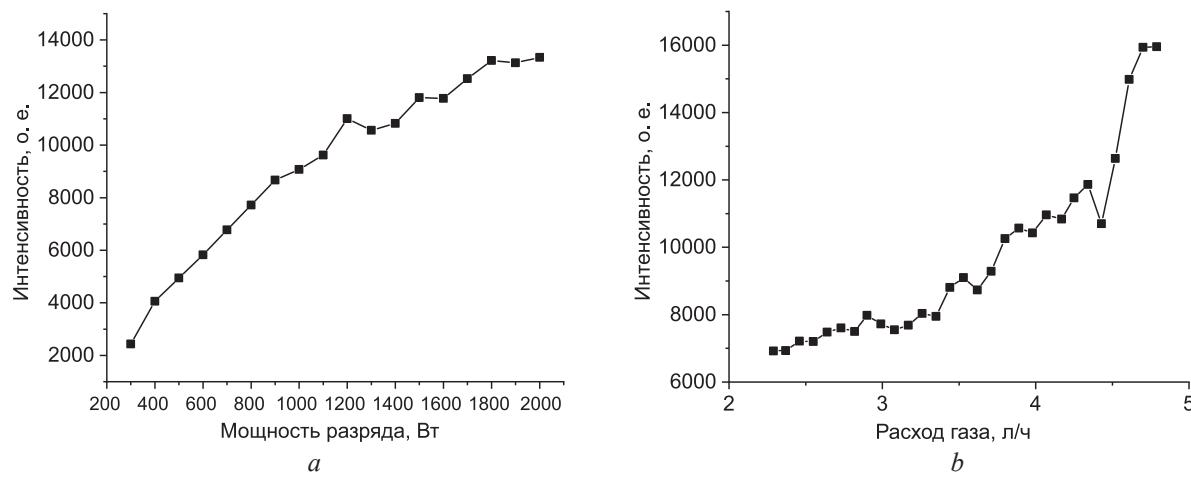


Рис. 4. Зависимость интенсивности от: a – мощности разряда при расходе Ar = 3,53 л/ч; b – расхода газа при мощности высокочастотного источника 1000 Вт
Fig. 4. Dependence of intensity on: a – discharge power at Ar flow rate of 3.53 l/h; b – gas flow rate at high-frequency source power of 1000 W

Полученные результаты показывают, что интенсивность линии с $\lambda = 811,53$ нм чувствительна к изменению расхода газа. Это позволяет использовать ее как в качестве индикатора стабильности режима разряда, так и для оптического контроля мощности при очистке в высокоплотной плазме аргона.

Заключение

1. Проведено комплексное исследование влияния режимов очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на морфологию и шероховатость поверхности стеклянных подложек. Изучено влияние мощности разряда и расхода газа на эмиссионный спектр высокоплотной плазмы. С помощью атомно-силовой микроскопии определены оптимальные условия обработки (300 Вт, 60 с), при которых достигается минимальная шероховатость без повреждения исходной поверхности, что особенно важно для последующего нанесения ультратонких покрытий.

2. С помощью оптической эмиссионной спектроскопии установлена высокая чувствительность интенсивности спектральной линии Ar I ($\lambda = 811,53$ нм) к изменениям мощности и расхода газа. Это позволяет использовать ее в качестве индикатора стабильности и эффективности очистки.

3. Выявленные закономерности позволяют не только точно настраивать режим очистки, но и закладывают основу для внедрения систем автоматического контроля и регулирования в плазменные технологии. Практическая значимость исследования заключается в повышении воспроизводимости и качества обработки стеклянных подложек.

Список литературы

1. Лучкин, А. Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А. Г. Лучкин, Г. С. Лучкин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 15. С. 208–210.
2. Stowers, I. F. Cleaning Optical Surfaces / I. F. Stowers, H. G. Patton // Optical Coatings: Applications and Uses II: Proceedings of the Technical Symposium “East”, 1978, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.1117/12.956265>.
3. Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications / J. Sun [et al.] // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 37221–37242.
4. Rauschenbach, B. Ion Beam Deposition and Cleaning / B. Rauschenbach // Springer Series in Materials Science. 2022. Vol. 324.
5. Ultra-Precision Surface Finishing by Ion Beam and Plasma Jet Techniques – Status and Outlook / T. Arnold [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Vol. 616, Iss. 2–3. P. 147–156.

6. Investigation of the Argon Temperature Modes in ICP-Processing of Glass-Ceramics / I. Gafarov [et al.] // Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26, Iss. 4. <https://doi.org/10.1063/1.5083022>.
7. Kramida, A. Atomic Spectra Database / A. Kramida, Yu. Ralchenko // NIST Standard Reference Database 78, Version 5.12. 2024.
8. Ion Energy Distributions Driven by the Ultra-Low Frequency Electrical Asymmetry Effect in Biased Inductively Coupled Plasmas / D.-S. Zhang [et al.] // Physics of Plasmas. 2025. Vol. 32, Iss. 8. <https://doi.org/10.1063/5.0258391>.
9. Desorption Lifetimes and Activation Energies Influencing Gas-Surface Interactions and Multiphase Chemical Kinetics / D. A. Knopf [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. 2024. Vol. 24, Iss. 6. P. 3445–3528. <https://doi.org/10.5194/acp-24-3445-2024>.

Поступила 19.08.2025

Принята в печать 15.09.2025

References

1. Luchkin A. G., Luchkin G. S. (2012) Cleaning the Surface of Substrates for Coating Application Using Vacuum-Plasma Methods. *Herald of Technological University*. (15), 208–210 (in Russian).
2. Stowers I. F., Patton H. G. (1978) Cleaning Optical Surfaces. *Optical Coatings: Applications and Uses II, Proceedings of the Technical Symposium "East" Washington, DC, USA*. <https://doi.org/10.1117/12.956265>.
3. Sun J., Yu Y., Tang J., Zeng Y., Chen. J. (2025) Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications. *IEEE Access*. 13, 37221–37242.
4. Rauschenbach B. (2022) Ion Beam Deposition and Cleaning. *Springer Series in Materials Science*. 324.
5. Arnold T., Böhm G., Fechner R., Meister J., Nickel A., Frost F., et al. (2010) 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*. 616 (2–3), 147–156.
6. Gafarov I., Tovstopyat A., Galeev V., Golyaeva A., Golyaev Y., Kuznetsov E. (2019) Investigation of the Argon Temperature Modes in ICP-Processing of Glass-Ceramics. *Physics of Plasmas*. 26 (4). <https://doi.org/10.1063/1.5083022>.
7. Kramida A., Ralchenko Yu. (2024) Atomic Spectra Database. *NIST Standard Reference Database 78, Version 5.12*.
8. Zhang D.-S., Wen D.-Q., Zhao M.-L., Gao F., Zhang Y.-Y., Wang Y.-N. (2025) Ion Energy Distributions Driven by the Ultra-Low Frequency Electrical Asymmetry Effect in Biased Inductively Coupled Plasmas. *Physics of Plasmas*. 32 (8). <https://doi.org/10.1063/5.0258391>.
9. Knopf D. A., Ammann M., Berkemeier T., Pöschl U., Shiraiwa M. (2024) Desorption Lifetimes and Activation Energies Influencing Gas-Surface Interactions and Multiphase Chemical Kinetics. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 24 (6), 3445–3528. <https://doi.org/10.5194/acp-24-3445-2024>.

Received: 19 August 2025

Accepted: 15 September 2025

Сведения об авторе

Логунов К. Т., асп. каф. микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-22-63
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Логунов Константин Тимофеевич

Information about the author

Logunov K. T., Postgraduate at Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-22-63
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Logunov Konstantin Timofeevich