



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51>

УДК 539.25, 548.528

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОЧИСТКИ В ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ АРГОНА НА МОРФОЛОГИЮ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

К. Т. ЛОГУНОВ, А. А. МИХОЛАП

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

Аннотация. Исследовано влияние параметров высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона на морфологию и характеристики поверхности подложек монокристаллического кремния. Обработка образцов проводилась в диапазоне мощностей высокочастотного источника от 100 до 1000 Вт при длительности очистки до 300 с. Морфология поверхности анализировалась методом атомно-силовой микроскопии с последующим исследованием краевого угла смачивания и работы адгезии. Отмечено влияние очистки в высокоплотной плазме на поверхностную энергию. Установлено, что эффективные параметры очистки для получения минимальной шероховатости и удаления загрязнений без повреждения поверхности – это мощность разряда 300–500 Вт и длительность воздействия 60–120 с. Полученные данные могут быть использованы при подборе режимов плазменной очистки подложек монокристаллического кремния в технологических процессах микроэлектроники.

Ключевые слова: очистка поверхности, высокоплотная индуктивно-связанная плазма, морфология поверхности, атомно-силовая микроскопия, монокристаллический кремний.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают 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 режимов очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию и свойства поверхности подложек монокристаллического кремния / К. Т. Логунов, А. А. Михолап // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51>.

THE INFLUENCE OF CLEANING PARAMETERS IN HIGH-DENSITY ARGON PLASMA ON THE MORPHOLOGY AND SURFACE PROPERTIES OF MONOCRYSTALLINE SILICON SUBSTRATES

KONSTANTIN LOGUNOV, ALIAKSEI MIKHOLAP

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

Abstract. The influence of high-density inductively coupled argon plasma parameters on the morphology and surface characteristics of single-crystal silicon substrates was studied. Samples were treated with high-frequency source powers ranging from 100 to 1000 W, with cleaning times of up to 300 s. Surface morphology was analyzed using atomic force microscopy, followed by a study of the contact angle and adhesion work. The effect of high-density plasma cleaning on surface energy was noted. It was found that effective cleaning parameters for achieving minimal roughness and removing contaminants without damaging the surface include a discharge power of 300–500 W and an exposure time of 60–120 s. The obtained data can be used to select plasma cleaning modes for single-crystal silicon substrates in microelectronics processes.

Keywords: surface cleaning, high-density inductively coupled plasma, surface morphology, atomic force microscopy, monocrystalline silicon.

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

Gratitude. The authors express 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., Mikholaп A. (2026) The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Morphology and Surface Properties of Monocrystalline Silicon Substrates. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51> (in Russian).

Введение

Подложки из монокристаллического кремния (Si) широко применяются в микро- и оптоэлектронике, фотовольтаике и других высокотехнологичных отраслях [1]. Для обеспечения высокой производительности и надежности устройств, сформированных на кремниевых подложках, требуется тщательная очистка их поверхности от загрязнений и дефектов. Однако даже после заключительной полировки и химической очистки поверхность Si в условиях хранения и эксплуатации быстро деградирует вследствие окисления, адсорбции органических соединений и накопления различных загрязнений [2]. Дефекты и контаминации служат центрами рекомбинации носителей заряда, ухудшают адгезию осаждаемых пленок и негативно влияют на параметры устройства, сформированного на кремниевой подложке [3, 4]. В результате снижаются выход годных изделий и их эксплуатационная надежность.

Очистка поверхности подложек монокристаллического Si проводится при помощи химических и физических методов. Однако многие методы имеют ряд недостатков, таких как риск повторного загрязнения, отсутствие однородности обработки, недостаточная эффективность, экологические ограничения и т. д. [5]. Все это приводит к необходимости поиска альтернативных способов очистки, где одно из перспективных направлений – методы очистки в плазме, в особенности, использующие высокоплотную индуктивно-связанную плазму [6]. Она характеризуется высокой плотностью заряженных частиц при относительно низких энергиях ионов, что обеспечивает интенсивное химическое взаимодействие с поверхностью загрязненными при минимальном физическом распылении и повреждении подложки [6, 7].

Стоит отметить, что воздействие методов очистки в плазме на поверхность монокристаллического Si представляет собой сложный физико-химический процесс, приводящий не только к удалению загрязнений, но и к модификации самой поверхности. Это может послужить причиной изменения шероховатости, микрорельефа, состава поверхностных функциональных групп и, как следствие, поверхностной энергии [8, 9].

Цель исследований – установление взаимосвязи между параметрами процесса очистки в высокоплотной плазме в среде аргона (Ar) (мощностью высокочастотного разряда (ВЧ-разряда), длительностью очистки) и их влиянием на поверхность подложки монокристаллического Si. Полученные данные позволят глубже понять процессы взаимодействия высокоплотной плазмы с поверхностью Si и подобрать эффективные режимы очистки.

Проведение эксперимента

Для проведения исследований в качестве образцов были выбраны подложки из монокристаллического Si марки КДБ-12, диаметром 100 мм и ориентацией (100). С целью оценки значимости влияния очистки на свойства подложек монокристаллического кремния выполнялась очистка методом высокоплотной индуктивно-связанной плазмы в вакуумной камере. Исследования проводили на экспериментальном комплексе на основе модифицированной ВУ-1БСп. Первоначально система была откачана до базового давления порядка $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Расстояние источник–подложка составляло 110 мм, а частота питающего напряжения – 13,56 МГц. Длительность очистки подложек в высокоплотной индуктивно-связанной плазме Ar – 0–300 с, мощность ВЧ-источника варьировалась в диапазоне 100–1000 Вт. Расход газа Ar – 3,6 л/ч.

Исследование морфологии поверхности и влияния режимов очистки на ее изменения проводилось методом атомно-силовой микроскопии. Сканирование выполнялось на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) с использованием кремниевых кантилеверов типа ScanAsyst (Bruker, Германия) с радиусом закругления острия 9 нм и жесткостью консоли 0,32 Н/м.

Для получения более точных значений параметров шероховатости поверхность исследовали контактным методом. Центральные области образцов сканировали на участке размерами 10×10 мкм². Параметры шероховатости, включая среднеарифметическое отклонение высот R_a , среднеквадратичное отклонение R_q и среднюю шероховатость по 10 точкам R_z , рассчитывали по полученным снимкам морфологии поверхности (рис. 1) с использованием специализированного программного обеспечения.

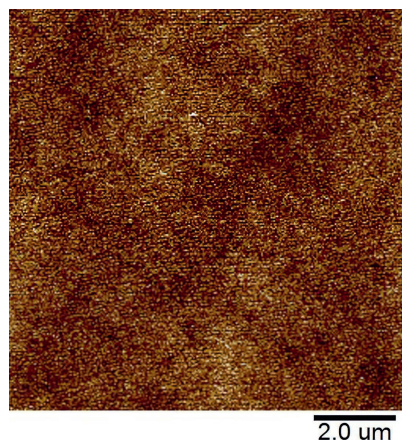


Рис. 1. Снимок морфологии поверхности подложки монокристаллического кремния, исследованной с помощью атомно-силовой микроскопии

Fig. 1. A snapshot of the surface morphology of a single-crystal silicon substrate examined using atomic force microscopy

Одним из ключевых параметров, характеризующих изменение поверхностных свойств твердого материала после плазменной обработки, является краевой угол смачивания. Его измерение позволяет оценить гидрофильность/гидрофобность поверхности, что, в свою очередь, тесно связано с такими факторами, как химический состав приповерхностного слоя, степень загрязненности, рельеф и шероховатость. Определение краевого угла смачивания необходимо для косвенной оценки эффективности удаления органических и неорганических загрязнений, а также для выявления возможных модификаций поверхностной энергии. Значение краевого угла смачивания находили методом лежащей капли. Определение статического краевого угла смачивания покрытия водой осуществлялось нанесением на поверхность капли дистиллированной воды объемом порядка 2,5 мкл с помощью специального шприца-дозатора. Затем выполнялись ее фотофиксация в режиме микросъемки на цифровом фотоаппарате (рис. 2) и последующий расчет.

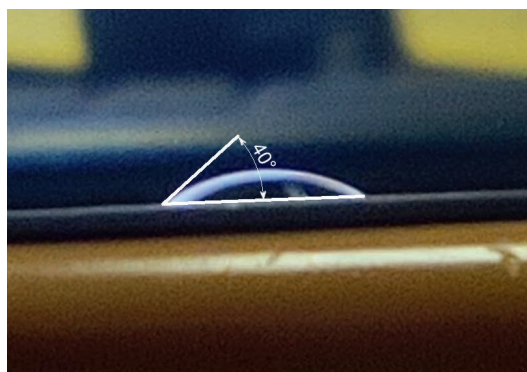


Рис. 2. Характерное изображение капли воды на поверхности подложки монокристаллического кремния

Fig. 2. A characteristic photo of a water droplet on the surface of a monocrystalline silicon substrate

Центральным элементом термодинамического подхода к оценке поверхностных свойств твердых тел является взаимосвязь краевого угла смачивания с работой адгезии, описываемая уравнением Дюпре – Юнга. Исходя из этого уравнения, работа адгезии W_a выражается через поверхностное натяжение тестовой жидкости γ_l и краевой угол θ : $W_a = \gamma_l(1 + \cos\theta)$. Тестовой жидкостью в проводимом исследовании выступала дистиллированная вода. Уравнение Дюпре – Юнга

служит основой для всех современных моделей определения поверхностной энергии твердых тел, так как позволяет перейти от измеренных контактных углов к расчету энергии межфазных взаимодействий, что, в конечном итоге, дает возможность оценить и саму поверхностную энергию твердого тела [10].

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были получены зависимости параметров шероховатости R_a , R_q и R_z поверхности подложки Si от времени очистки и мощности ВЧ-источника (рис. 3), которые позволяют сделать вывод о применимости высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона для очистки подложек монокристаллического кремния: показана возможность уменьшения значений параметров шероховатости ниже исходных (соответствуют нулю по оси абсцисс). Данный эффект достигает наименьших величин при режиме с мощностью разряда 300 Вт и длительностью обработки поверхности 60 с. Этот режим оказывает минимальное влияние на поверхность, в основном взаимодействуя лишь с имеющимися на ней инородными элементами.

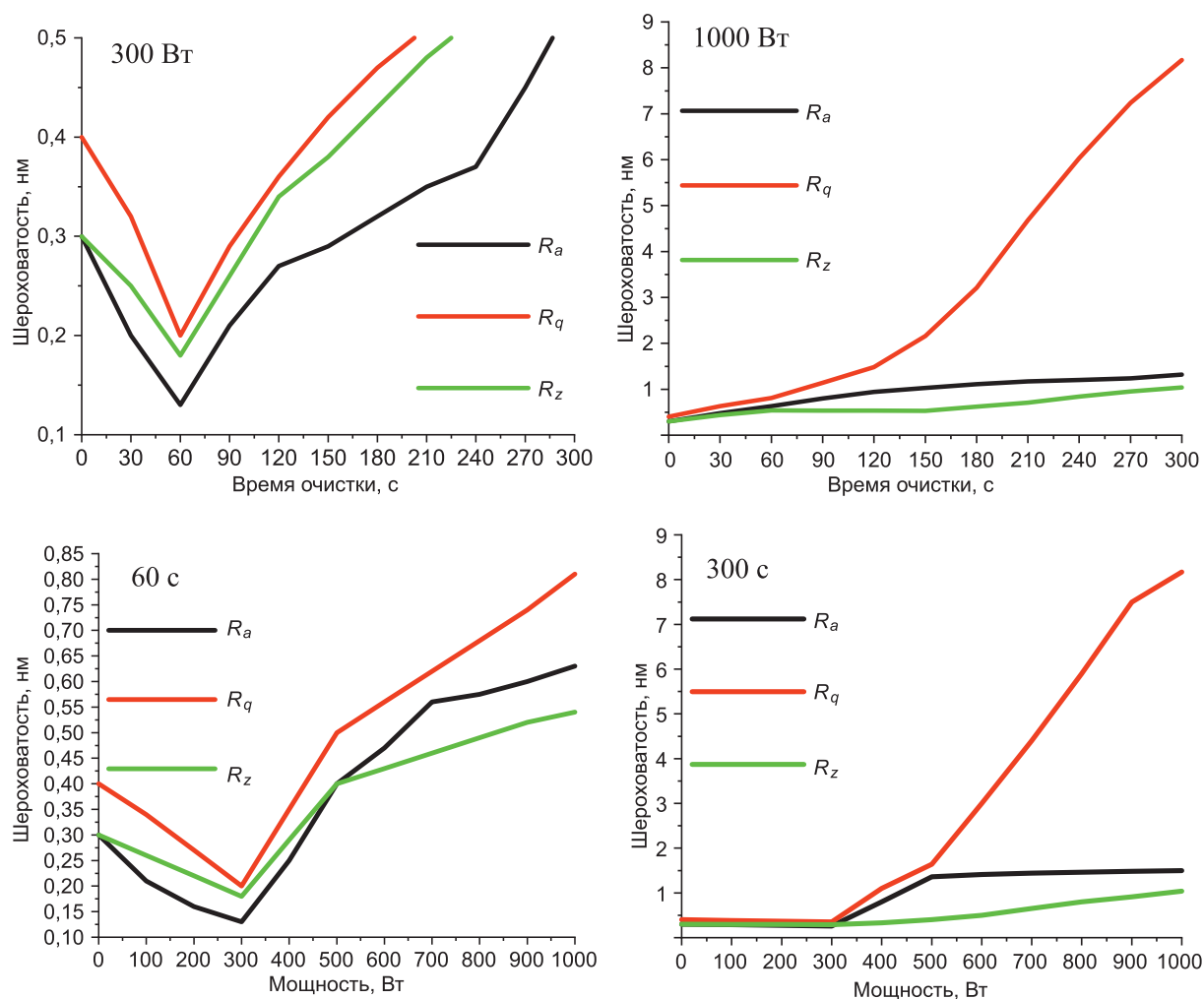


Рис. 3. Зависимость параметров шероховатости поверхности кремниевой подложки от времени очистки и мощности ВЧ-источника

Fig. 3. Dependence of silicon substrate surface roughness parameters on cleaning time and RF source power

Установлено, что уменьшение мощности приводит к увеличению длительности очистки. Напротив, при увеличении мощности разряда можно предположить появление значительного взаимодействия высокоплотной плазмы непосредственно с поверхностью подложки, приводящего к увеличению значений параметров шероховатости. В рассматриваемом случае при длительности более 150 с наблюдалось увеличение изменения параметра R_q на порядок по сравнению с изме-

нениями в режимах до 1000 Вт. Это указывает на появление множества дефектов на поверхности, за счет чего среднеквадратичная шероховатость начинает расти значительно быстрее. Также данный факт подтверждается большим значением R_z на начальных этапах очистки.

Исследовали изменение краевого угла смачивания в зависимости от режимов очистки поверхности Si. На основе полученных данных и уравнения Дюпре – Юнга проводили оценку работы адгезии на границе раздела фаз. Зависимости краевого угла смачивания и работы адгезии поверхности монокристаллического кремния от времени очистки высокоплотной индуктивно-связанной плазмой в среде аргона и мощности ВЧ-разряда приведены на рис. 4.

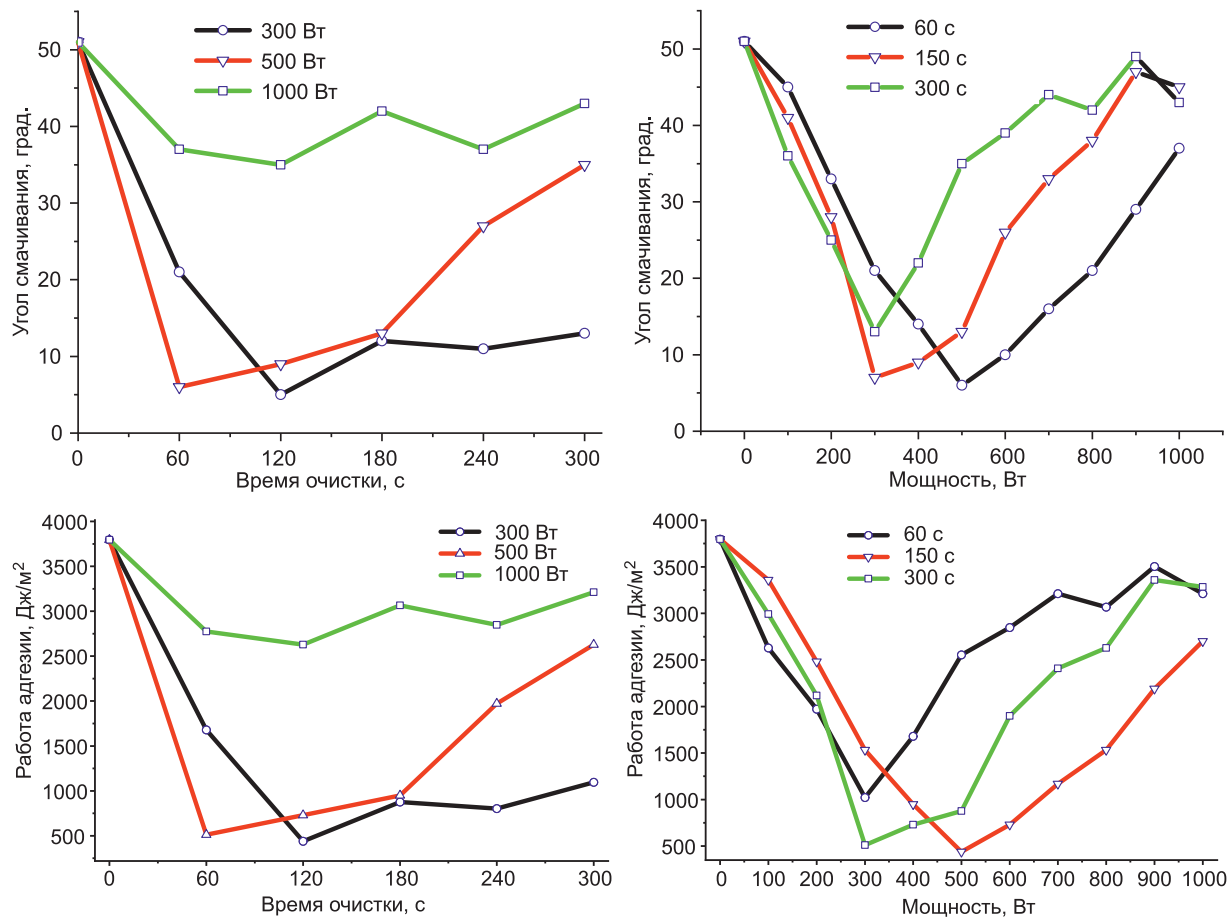


Рис. 4. Зависимость краевого угла смачивания и работы адгезии поверхности монокристаллического кремния от времени очистки и мощности ВЧ-разряда

Fig. 4. Dependence of the contact angle of wetting and the work of adhesion of the surface of monocrystalline silicon on the cleaning time and the power of the RF discharge

При всех длительностях обработки зависимости имеют нелинейный характер и демонстрируют выраженный минимум, соответствующий эффективной очистке и активации поверхности. Наблюдается резкое уменьшение значения работы адгезии на границе раздела фаз в течение первой минуты обработки. Также отмечен минимум значения работы адгезии в зависимости от величины мощности ВЧ-разряда. В частности, в случае мощности ВЧ-источника 500 Вт и более достижение минимума происходит в течение 60 с, а при уменьшении мощности разряда до 300 Вт минимальная работа адгезии достигается при длительности очистки порядка 120 с. Дальнейшее уменьшение мощности разряда продолжает эту тенденцию, в связи с чем режимы с мощностью до 300 Вт можно признать нецелесообразными для очистки поверхностей подложек монокристаллического кремния.

Анализ зависимостей краевого угла смачивания и работы адгезии от времени очистки и мощности ВЧ-разряда на рис. 4 указывает на возможность получения минимальных значений при определенных режимах: 5° – 6° и 500 Дж/м^2 при 60–120 с взаимодействия плазмы с поверхностью и при мощности 300–500 Вт. При увеличении мощности ВЧ-разряда до 1000 Вт и/или дли-

тельности очистки более 150 с происходит увеличение значений шероховатости обрабатываемой поверхности, что может быть обусловлено ее значительным повреждением [11].

Полученные данные доказывают эффективность высокоплотной индуктивно-связанной плазмы для очистки поверхности от органических загрязнений и ее активации. При этом длительность процесса обработки остается небольшой для устранения влияния плазмы непосредственно на подложку монокристаллического кремния. Данный эффект обусловлен комплексом физико-химических процессов, происходящих на поверхности подложки при воздействии высокоплотной индуктивно-связанной плазмой и ее производными.

Основным механизмом, приводящим к уменьшению шероховатости поверхности подложки монокристаллического кремния, ее краевого угла смачивания и, как следствие, работы адгезии, является удаление органических загрязнений, неизбежно присутствующих на кремниевой поверхности после хранения в атмосфере и подготовки к обработке. Эти загрязнения обладают гидрофобными свойствами и способствуют увеличению угла смачивания. При воздействии на обрабатываемую подложку монокристаллического кремния высокоплотной индуктивно-связанной плазмой в среде аргона происходит взаимодействие поверхности подложки и ионов Ar^+ , что приводит к диссоциации молекул загрязнений и их десорбции из подложки в объем плазмы [12–14]. Кроме того, несмотря на обработку в вакууме, полностью исключить образование гидрофильных групп за счет взаимодействия остаточной влаги или атмосферного кислорода, сорбированного на поверхности подложки, с активными плазменными частицами в результате плазменной обработки невозможно. При воздействии высокоплотной плазмой происходит активация поверхности кремния [15]. Это приводит к увеличению поверхностной энергии и, как следствие, к уменьшению значения краевого угла смачивания.

Заключение

1. Проведено комплексное исследование влияния режимов очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на параметры шероховатости и энергию поверхности подложек монокристаллического кремния. Использование атомно-силовой микроскопии позволило определить оптимальные условия обработки, при которых достигается минимальная шероховатость без повреждения исходной поверхности, что особенно важно для последующего нанесения ультратонких покрытий. Определено, что при малых мощностях (до 300 Вт) воздействие плазмы минимально и ограничивается удалением загрязнений. Энергия более 500 Вт инициирует рост шероховатости.

2. Результаты измерения краевого угла смачивания и последующие расчеты работы адгезии позволили подтвердить эффективность плазменной очистки для активации поверхности. Наиболее существенное уменьшение угла смачивания до 5° – 6° и минимальная величина работы адгезии поверхности (438 и 511 Дж/м) достигаются при мощности 300–500 Вт и времени обработки в диапазоне 60–120 с. Дальнейшее увеличение времени и мощности увеличивает угол смачивания, значение работы адгезии и параметры шероховатости поверхности монокристаллического кремния.

3. Выявленные зависимости позволяют точно настраивать режимы очистки согласно требуемым целям, таким как достижение планарности при минимальных значениях шероховатости поверхности или создание более развитых поверхностей за счет увеличения мощности и длительности процесса очистки. Практическая значимость исследований заключается в повышении воспроизводимости и качества обработки подложек монокристаллического кремния, что особенно важно для микроэлектроники.

Список литературы

1. A Review of Silicon-Based Wafer Bonding Processes, an Approach to Realize the Monolithic Integration of Si-CMOS and III–V-on-Si Wafers / S. Y. Bao [et al.] // Journal of Semiconductors. 2021. Vol. 42, Iss. 2. P. 023–106. <http://doi.org/10.1088/1674-4926/42/2/023106>.
2. Koichiro, S. Influence of Silicon-Wafer Loading Ambients in an Oxidation Furnace on the Gate Oxide Degradation Due to Organic Contamination / S. Koichiro, H. Takeshi // Applied Physics Letters. 1997. Vol. 71, No 25. P. 3670–3672.

3. Removal Efficiency of Organic Contaminants on Si Wafer Surfaces by the N₂O ECR Plasma Technique / D. K. Kim [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 91, Iss. 2. P. 490–493.
4. Hattori, T. Chemical Contamination Control in ULSI Wafer Processing / T. Hattori // *AIP Conference Proceedings*. 2001. Vol. 550. P. 275–284. <https://doi.org/10.1063/1.1354411>.
5. Bera, B. Silicon Wafer Cleaning: A Fundamental and Critical Step in Semiconductor Fabrication Process / B. Bera // *International Journal of Applied Nanotechnology*. 2019. Vol. 5, Iss. 1. P. 8–13.
6. Sammut, S. A. Comprehensive Review of Plasma Cleaning Processes Used in Semiconductor Packaging / S. A. Sammut // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No 13. <https://doi.org/10.3390/app15137361>.
7. Cheng, Y. L. Plasma Damage on Low-k Dielectric Materials / Y. L. Cheng, C. Y. Lee, C. W. Haung // *Plasma Science and Technology*. 2018. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.79494>.
8. Argon Plasma Improves the Tissue Integration and Angiogenesis of Subcutaneous Implants by Modifying Surface Chemistry and Topography / M. Griffin [et al.] // *International Journal of Nanomedicine*. 2019. Vol. 14. P. 1993–1994. <https://doi.org/10.2147/IJN.S206850>.
9. ICP Polishing of Silicon for High-Quality Optical Resonators on a Chip / A. Laliotis [et al.] // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2012. Vol. 22, No 12. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/12/125011>.
10. Karbowski, T. Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review / T. Karbowski, F. Debeaufort, A. Voilley // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition References*. 2006. Vol. 46, No 5. P. 391–407.
11. Hess, D. W. Plasma Stripping, Cleaning, and Surface Conditioning. *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*. 3rd ed. / D. W. Hess, A. K. Reinhardt // William Andrew Publishing. 2018. P. 379–455.
12. Two Modes of Surface Roughening During Plasma Etching of Silicon: Role of Ionized Etch Products / N. Nobuya [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116. P. 223–302.
13. Alam, A. U. The Effects of Oxygen Plasma and Humidity on Surface Roughness, Water Contact Angle and Hardness of Silicon, Silicon Dioxide and Glass / A. U. Alam, M. Howlader, M. J. Deen // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2014. Vol. 24, No 3. P. 10–35.
14. Lieberman, M. A. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
15. Belford, R. E. Surface Activation Using Remote Plasma for Hydrophilic Bonding at Elevated Temperature / R. E. Belford, S. Sood // *Electrochemical and Solid State Letters*. 2007. Vol. 10, No 5. DOI: 10.1149/1.2709397.

Поступила 07.04.2026

Принята в печать 04.05.2026

References

1. Bao S. Y., Wang Y., Lina K., Zhang L., Wang B., Sasangka W. A., et al. (2021) A Review of Silicon-Based Wafer Bonding Processes, an Approach to Realize the Monolithic Integration of Si-CMOS and III–V-on-Si Wafers. *Journal of Semiconductors*. 42 (2), 023–106. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/2/023106>.
2. Koichiro S., Takeshi H. (1997) Influence of Silicon-Wafer Loading Ambients in an Oxidation Furnace on the Gate Oxide Degradation Due to Organic Contamination. *Applied Physics Letters*. 71 (25), 3670–3672.
3. Kim D. K., Park Y. K., Biswas S., Lee C. (2005) Removal Efficiency of Organic Contaminants on Si Wafer Surfaces by the N₂O ECR Plasma Technique. *Materials Chemistry and Physics*. 91 (2), 490–493.
4. Hattori T. (2001) Chemical Contamination Control in ULSI Wafer Processing. *AIP Conference Proceedings*. 550, 275–284. <https://doi.org/10.1063/1.1354411>.
5. Bera B. (2019) Silicon Wafer Cleaning: A Fundamental and Critical Step in Semiconductor Fabrication Process. *International Journal of Applied Nanotechnology*. 5 (1), 8–13.
6. Sammut S. A. (2025) Comprehensive Review of Plasma Cleaning Processes Used in Semiconductor Packaging. *Applied Sciences*. 15 (13). <https://doi.org/10.3390/app15137361>.
7. Cheng Y. L., Lee C. Y., Haung C. W. (2019) Plasma Damage on Low-k Dielectric Materials. *Plasma Science and Technology*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.79494>.
8. Griffin M., Palgrave R., Baldovino-Medrano V. G., Butler P. E., Kalaskar D. M. (2019) Argon Plasma Improves the Tissue Integration and Angiogenesis of Subcutaneous Implants by Modifying Surface Chemistry and Topography. *International Journal of Nanomedicine*. 14, 1993–1994. <https://doi.org/10.2147/IJN.S206850>.
9. Laliotis A., Trupke M., Cotter J. P., Lewis G., Kraft M., Hinds E. A. (2012) ICP Polishing of Silicon for High-Quality Optical Resonators on a Chip. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 22 (12). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/12/125011>.
10. Karbowski T., Debeaufort F., Voilley A. (2006) Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition References*. 46 (5), 391–407.

11. Hess D. W., Reinhardt A. K. (2018) Plasma Stripping, Cleaning, and Surface Conditioning. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology. 3rd ed. *William Andrew Publishing*. 379–455.
12. Nobuya N., Hirota T., Yoshinori T., Koji E., Kouich O. (2014) Two Modes of Surface Roughening During Plasma Etching of Silicon: Role of Ionized Etch Products. *Journal of Applied Physics*. 116, 223–302.
13. Alam A. U., Howlader M., Deen M. J. (2014) The Effects of Oxygen Plasma and Humidity on Surface Roughness, Water Contact Angle and Hardness of Silicon, Silicon Dioxide and Glass. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 24 (3), 10–35.
14. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. (2005) *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. USA, John Wiley and Sons, Inc. Publ.
15. Belford R. E., Sood S. (2007) Surface Activation Using Remote Plasma for Hydrophilic Bonding at Elevated Temperature. *Electrochemical and Solid State Letters*. 10 (5). DOI: 10.1149/1.2709397.

Received: 7 April 2026

Accepted: 4 May 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Логунов К. Т., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, зам. декана факультета радиотехники и электроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Михолап А. А., студент, 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 17 293-89-91
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Логунов Константин Тимофеевич

Information about the authors

Logunov K., Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, Deputy Dean of the Faculty of Radio Engineering and Electronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Mikholap A., Student, 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 17 293-89-91
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Logunov Konstantin