



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11>

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ В СРЕДЕ АЗОТА НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЕВ ДВУОКСИ КРЕМНИЯ И ЕЕ ГРАНИЦЫ С КРЕМНИЕМ

Н. С. КОВАЛЬЧУК, В. А. ПИЛИПЕНКО, Я. А. СОЛОВЬЁВ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Методами инфракрасной Фурье-спектрометрии, спектральной эллипсомерии, времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов, исследованиями вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик установлено влияние импульсной фотонной обработки в среде азота некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на нерабочую сторону пластины, обеспечивающей нагрев до 1150 °С за время около 7 с, на оптические свойства слоев двуокиси кремния толщиной 17,7 нм, сформированных пирогенным окислением кремния, легированного бором с ориентацией (100), и на электрофизические характеристики границы раздела ее с кремнием. Выявлено, что импульсная фотонная обработка слоев двуокиси кремния приводит к уплотнению и перестройке ее структуры, а также к образованию в двуокиси кремния связей Si–N, обеспечивающих нитридизацию SiO₂. На это указывают сдвиг, уменьшение полуширины и напряжения основной полосы поглощения Si–O-связи, уменьшение коэффициента преломления с 1,48 до 1,47 и увеличение толщины слоя до 18,2 нм. Показано, что нитридизация слоев SiO₂ при импульсной фотонной обработке в атмосфере азота приводит к уменьшению тока утечки диэлектрика в четыре раза и плотности его заряда в 3,43 раза. Это соответственно в 2,19 и 3,01 раза больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях за счет формирования на границе Si–SiO₂ слоя с увеличенной концентрацией азота. Полученные результаты могут быть использованы при создании диэлектрических покрытий в изделиях электронной техники.

Ключевые слова: двуокись кремния, импульсная фотонная обработка, пирогенное окисление, нитридизация, коэффициент преломления, электрофизические характеристики.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы благодарят начальника сектора государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» Д. В. Жигулина за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Для цитирования. Ковальчук, Н. С. Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота на оптические и электрофизические характеристики слоев двуокиси кремния и ее границы с кремнием / Н. С. Ковальчук, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьёв // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 3. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11>.

EFFECT OF PULSED PHOTON PROCESSING IN NITROGEN AMBIENT ON OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SILICON DIOXIDE LAYERS AND ITS BOUNDARIES WITH SILICON

NATALIA S. KOVALCHUK, VLADIMIR A. PILIPENKO, JAROSLAV A. SOLOVJOV

JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The influence of pulsed photon processing in a nitrogen medium with an incoherent radiation flux from quartz halogen lamps directed to the non-working side of the wafer, providing heating to 1150 °C in about 7 s, on the optical properties of 17.7 nm thick silicon dioxide layers formed by pyrogenic oxidation of silicon doped with boron with the orientation (100), and on the electrophysical characteristics of the interface with silicon was established using the methods of infrared Fourier spectrometry, spectral ellipsometry, time-of-flight mass spectroscopy of secondary ions, and studies of the current-voltage and capacitance-voltage characteristics. It was revealed that pulsed photon processing of silicon dioxide layers leads to compaction and rearrangement of its structure, as well

as to the formation of Si–N bonds in silicon dioxide, providing nitridation of SiO₂. This is indicated by the shift, decrease in the half-width and voltage of the main absorption band of the Si–O bond, decrease in the refractive index from 1.48 to 1.47 and increase in the layer thickness to 18.2 nm. It is shown that nitridation of SiO₂ layers during pulsed photon processing in a nitrogen atmosphere leads to a decrease in the leakage current of the dielectric by four times and its charge density by 3.43 times. This is 2.19 and 3.01 times more, respectively, than during processing in natural atmospheric conditions due to the formation of a layer with an increased nitrogen concentration at the Si–SiO₂ boundary. The results obtained can be used to create dielectric coatings in electronic products.

Keywords: silicon dioxide, pulsed photon processing, pyrogenic oxidation, nitridation, refractive index, electro-physical characteristics.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors thank the head of the sector of the state center “Belmicroanalysis” of JSC “INTEGRAL” D. V. Zhigulin for assistance in conducting experimental studies.

For citation. Kovalchuk N. S., Pilipenko V. A., Solovjov Ja. A. (2025) Effect of Pulsed Photon Processing in Nitrogen Ambient on Optical and Electrophysical Characteristics of Silicon Dioxide Layers of Its Boundaries with Silicon. *Doklady BGUIR*. 23 (3), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11> (in Russian).

Введение

Процессы термического окисления кремния играют важную роль в технологии формирования изделий интегральной электроники. Вместе с тем существенное влияние на свойства слоев двуокиси кремния (SiO₂) и ее границы раздела с кремнием оказывают условия проведения процесса. Наиболее качественные слои двуокиси кремния, приближающиеся по свойствам к объемному материалу с минимальной плотностью зарядовых состояний на границе раздела с кремнием, получают путем окисления в сухом кислороде. Однако термическое окисление кремния в сухом кислороде необходимо проводить при температуре выше 1000 °С, что приводит к диффузионному перераспределению примесей в уже сформированных ионно-легированных областях и вызывает трудности при формировании подзатворного диэлектрика для субмикронных изделий микроэлектроники [1]. Для понижения температуры окисления широко применяют пирогенное окисление, представляющее собой процесс окисления кремния в кислороде, увлажненном молекулами H₂O, синтезированными из атомарно чистого кислорода и водорода. Данный подход обеспечил снижение температуры окисления кремния до 850 °С, тем самым уменьшил недостатки термического окисления кремния в сухом кислороде, обусловленные высокой температурой его проведения. Однако при таких низких температурах окисления это приводит к увеличению плотности зарядовых состояний, что обусловлено наличием оборванных связей кремния на границе раздела SiO₂–Si и присутствием на ней и в объеме двуокиси кремния гидроксильных групп и водорода.

Как показано в [2–5], для устранения недостатков процесса пирогенного окисления кремния целесообразно проводить модификацию сформированной двуокиси кремния с применением импульсной фотонной обработки в естественных атмосферных условиях при температуре до 1100–1150 °С. Это позволило значительно улучшить электрофизические свойства как слоя SiO₂, так и его границы раздела с кремнием. Представляет интерес проведение такой обработки в атмосфере азота, поскольку эта среда может привести к нитридизации диэлектрика и, как следствие, к более значительным изменениям его структуры и электрофизических параметров. В процессе исследований установлено влияние импульсной фотонной обработки в среде азота слоев двуокиси кремния, полученных пирогенным окислением подложек монокристаллического кремния, на ее оптические свойства и электрофизические характеристики границы раздела SiO₂ с кремнием.

Методика проведения эксперимента

Слои двуокиси кремния толщиной 17,7 нм формировали путем пирогенного окисления подложек монокристаллического кремния марки КДБ12 диаметром 100 мм с ориентацией (100) при температуре 850 °С в течение 40 мин. Затем часть подложек подвергли импульсной фотонной обработке в среде азота, обеспечивающей нагрев до 1150 °С за время около 7 с некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на нерабочую сторону пластины.

Анализ оптических свойств проводили путем сопоставления спектров пропускания слоев двуокиси кремния, полученных после пирогенного окисления и импульсной фотонной обработки, с применением ИК-Фурье спектрометра VERTEX 70 (Bruker, Германия) и определения их коэффициентов преломления и толщины методом спектральной эллипсометрии с использованием спектрального эллипсометра UVISEL 2 (Horiba, Франция). Электрофизические характеристики границы раздела слоев двуокиси кремния с кремниевой подложкой оценивались путем анализа их пробивных напряжений, токов утечки и вольт-фарадных характеристик ($C-V$ -характеристик) системы Si-SiO₂ с применением комплекса B1500 (Agilent, США) с зондовой станцией Summit 11000 AP (Cascade, США). Для анализа распределения концентрации связи Si-N по толщине слоев SiO₂ и поверхностного слоя кремния использовался масс-спектрометр вторичных ионов TOF.SIMS 5 (IONTOF, Германия).

Результаты исследований и их обсуждение

Согласно рис. 1, где изображены спектры пропускания двуокиси кремния до и после импульсной фотонной обработки, имеют место сдвиг основной полосы поглощения связи Si-O в коротковолновую область, уменьшение ее полуширины и увеличение интенсивности. Такие изменения говорят как об улучшении структуры двуокиси кремния, а именно об уменьшении ее пористости и о снижении напряжения данной связи, так и об увеличении его толщины. Кроме того, появляется пик на 1161,93 см⁻¹, свойственный связи Si-N. Данный эффект получается потому, что фотонная обработка при температуре 1150 °C в среде азота приводит к его диффузии в двуокись кремния и к формированию связей с оборванными связями кремния. Образованию таких незаполненных связей способствовал способ получения слоев двуокиси кремния при низких температурах, что подтверждают результаты их исследований методом спектральной эллипсометрии.

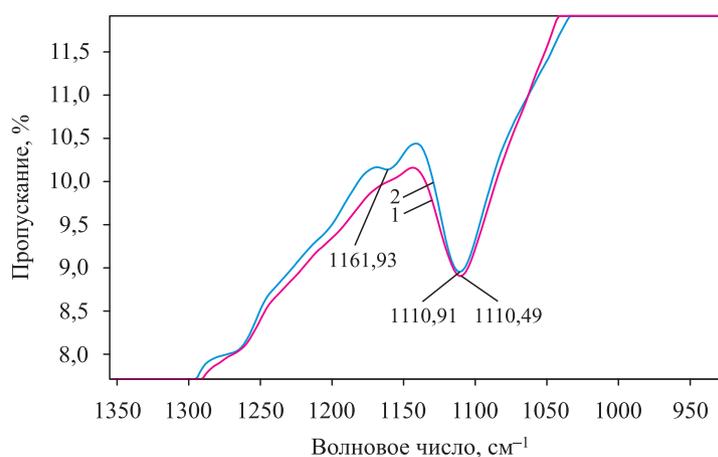


Рис. 1. Спектры пропускания слоев диоксида кремния:

1, 2 – до и после импульсной фотонной обработки

Fig. 1. Transmission spectra of silicon dioxide layers:

1, 2 – before and after pulsed photon processing

Установлено, что импульсная фотонная обработка слоя двуокиси кремния, полученного пирогенным окислением кремния, приводит к уменьшению коэффициента преломления с 1,48 до 1,47 и увеличению толщины пленки с 17,7 до 18,2 нм. Аналогичные результаты по увеличению толщины слоя (на 0,3 нм) двуокиси кремния при ее нитридизации получены и в [6]. Увеличение толщины слоя двуокиси кремния может объясняться тем, что при фотонной обработке в среде азота идут два процесса – уплотнение окисла за счет устранения группы OH из окисла, а также его рост при образовании связей Si-N, длина которых составляет ~0,1742 нм по сравнению с 0,1651 нм для Si-O. Последний процесс является преобладающим, что и вызывает рост толщины диэлектрика. Об этом также свидетельствует уменьшение коэффициента преломления пирогенной двуокиси кремния после импульсной фотонной обработки в среде азота с 1,48 до 1,47, что вызвано нарушением стехиометрии окисного слоя в результате образования дополнительных связей Si-N. Таким образом, проведение импульсной фотонной обработки двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением, обеспечивающей нагрев до 1150 °C в среде азота, приво-

дит как к уплотнению, так и к перестройке ее структуры. На это указывают сдвиг, уменьшение полуширины и напряжения основной полосы поглощения Si–O-связи, уменьшение коэффициента преломления с 1,48 до 1,47, увеличение толщины слоя до 18,2 нм и образование в двуокиси кремния связей Si–N, обеспечивающих нитридизацию SiO₂.

Улучшение структуры слоя двуокиси кремния, полученного пирогенным окислением, после импульсной фотонной обработки в среде азота подтверждает анализ пробивных напряжений и токов утечки. Исследование данных характеристик показало, что проведение импульсной фотонной обработки пленок пирогенной двуокиси кремния приводит к увеличению ее напряжения пробоя с 17,3 до 18,0 В при уровне тока 1,0 мА и к уменьшению тока утечки с $1,0 \cdot 10^{-11}$ до $2,5 \cdot 10^{-12}$ А при напряжении 5,0 В. Поскольку толщина окисла увеличилась на 0,5 нм, такие изменения пробивного напряжения и токов утечки объяснить увеличением толщины диэлектрика невозможно. Полученные результаты можно связать лишь с образованием связей Si–N и уплотнением окисного слоя за счет снижения его пористости и перестройки структуры при импульсной фотонной обработке в среде азота.

Подтверждением влияния нитридизации слоя SiO₂ на напряжение пробоя и ток утечки является их сопоставление с параметрами, имеющими место при импульсной фотонной обработке пирогенной двуокиси кремния в естественных атмосферных условиях [3, 4]. В этом случае пробивное напряжение увеличивалось в 1,03 раза, а ток утечки уменьшился в 1,32 раза, в то время как при импульсной фотонной обработке в среде азота данные величины составили 1,04 и четыре раза соответственно. При этом следует отметить, что в [3, 4] толщина слоя SiO₂ составляла 42,5 нм и была в 2,4 раза больше толщины исследуемого диэлектрика. Приведенные данные показывают, что при обработке в азоте указанные выше параметры двуокиси кремния превышают аналогичные параметры, полученные при проведении процесса в естественных атмосферных условиях. То есть нитридизация SiO₂ оказала значительно большее воздействие на уменьшение тока утечки, что может быть связано только с образованием связей Si–N. Поскольку молекулы азота, не имеющие связей с атомами кремния в SiO₂, являются его дефектами, приводящими к увеличению тока утечки, отсутствие роста тока утечки позволяет утверждать, что азот в основном связан с кремнием, обеспечивая тем самым значительное уменьшение его величины. Такой результат может быть обусловлен как азотированием SiO₂ методом ионного легирования азотом с последующей импульсной фотонной обработкой, так и длительной термической обработкой в среде азота, компенсацией оборванных связей кремния за счет формирования с ними прочных ковалентных связей с азотом [7, 8].

Анализ вольт-фарадных характеристик (рис. 2) системы Si–SiO₂, сформированной на основе данных пленок, показал, что импульсная фотонная обработка в среде азота уменьшает плотность заряда с $1,82 \cdot 10^{11}$ до $5,30 \cdot 10^{10}$ см⁻², что полностью объясняется как перестройкой структуры пленки, которая происходит в ней во время такой обработки в азоте при нагреве до 1150 °С, так и устранением инверсного слоя в кремнии, сформированного зарядовыми состояниями в слое окисла.

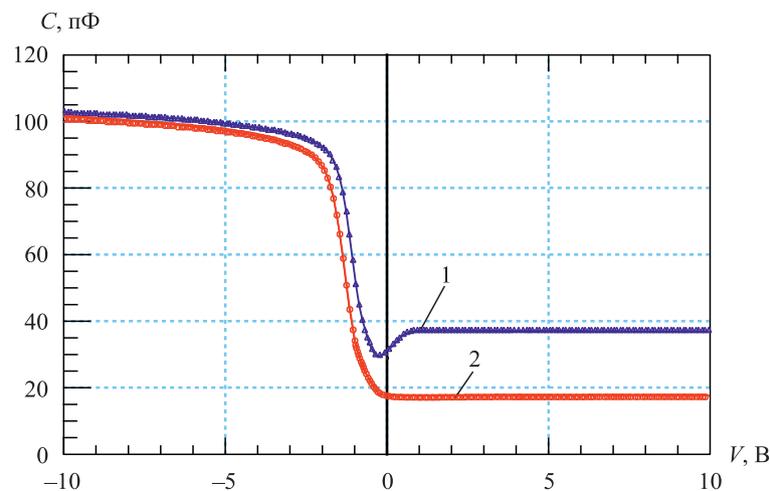


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики слоев SiO₂, полученных пирогенным окислением кремния: 1, 2 – до и после импульсной фотонной обработки

Fig. 2. Capacitance-voltage characteristics of SiO₂ layers obtained by pyrogenic oxidation of silicon: 1, 2 – before and after pulsed photon processing

Это подтверждается сопоставлением зарядовых свойств слоев SiO_2 после импульсной фотонной обработки в среде N_2 с результатами, полученными при обработке в естественных атмосферных условиях [3, 4]. Так, заряд в двуокиси кремния после обработки в азоте был в 2,19 раза меньше, чем его величина, приведенная в [3, 4]. Это можно объяснить тем, что при обработке в азоте образование связей Si-N может идти, как указывалось ранее, в местах оборванных связей кремния. Поскольку междоузельный кремний образуется как в объеме слоя двуокиси кремния за счет диссоциации группы OH на кислород и водород, так и в области межфазной границы Si-SiO_2 при оборванных связях Si на поверхности кремниевой пластины, нитридизация SiO_2 будет идти по всей ее толщине. При этом максимальная концентрация связей Si-N будет иметь место на межфазной границе Si-SiO_2 за счет наличия на ней значительно большей концентрации междоузельных атомов кремния, чем в остальном объеме двуокиси кремния.

Образование слоя с высокой концентрацией связей Si-N на межфазной границе экспериментально подтверждается исследованиями системы Si-SiO_2 времяпролетной масс-спектроскопией вторичных ионов (рис. 3). Кроме того, можно отметить увеличение концентрации связей Si-N на внешней поверхности слоя и их наличие в объеме диэлектрика. Увеличение концентрации таких связей на межфазной границе обеспечивает значительное уменьшение концентрации междоузельных атомов кремния.

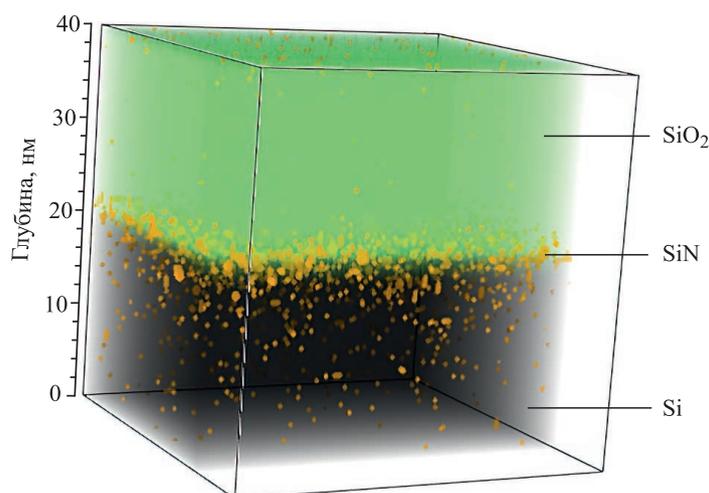


Рис. 3. 3D-распределение SiO_2 , SiN и Si в системе Si-SiO_2 после импульсной фотонной обработки
Fig. 3. 3D distribution of the SiO_2 , SiN , and Si in the Si-SiO_2 system after pulsed photon processing

Поскольку оборванные связи кремния являются основной причиной повышения фиксированного заряда в двуокиси кремния и заряда быстрых поверхностных состояний, это объясняет значительное уменьшение плотности заряда в слоях SiO_2 при их импульсной фотонной обработке в среде азота.

Таким образом, нитридизация слоев SiO_2 при импульсной фотонной обработке в атмосфере азота вызывает формирование на границе слоя Si-SiO_2 с увеличенной концентрацией азота. Сформированный слой обеспечивает уменьшение тока утечки диэлектрика в четыре раза и его заряда в 3,43 раза, что в 2,19 и 3,01 раза соответственно больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях.

Заключение

1. Проведение импульсной фотонной обработки двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением, обеспечивающей нагрев до $1150\text{ }^\circ\text{C}$ в среде азота, приводит как к уплотнению, так и к перестройке ее структуры. На это указывают сдвиг, уменьшение полуширины и напряжения основной полосы поглощения Si-O -связи, уменьшение коэффициента преломления с 1,48 до 1,47, увеличение толщины слоя с 17,7 до 18,2 нм и образование в двуокиси кремния связей Si-N , обеспечивающих нитридизацию SiO_2 .

2. Нитридизация слоев SiO_2 при импульсной фотонной обработке в атмосфере азота приводит к уменьшениям тока утечки диэлектрика в четыре раза и его заряда в 3,43 раза, что в 2,19 и 3,01 раза соответственно больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях за счет формирования на границе слоя Si-SiO_2 с увеличенной концентрацией азота.

3. Полученные результаты могут быть использованы при создании диэлектрических покрытий в изделиях электронной техники.

Список литературы

- 1 Doering, R. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, 2nd ed. / R. Doering, Y. Nishi. NY: CRC Press, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420017663>.
2. Влияние быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления / В. М. Анищик [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2018. № 2. С. 81–85.
3. Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Electro-Physical Properties of Silicon Dioxide, Obtained with Pyrogenous Oxidation / V. A. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes. 2019. Vol. 23, No 3. P. 283–290. DOI: 10.1615/HighTempMatProc. 2019031122.
4. Pilipenko, V. A. Influence of Fast Thermal Treatment on the Electrophysical Properties of Silicon Dioxide / V. A. Pilipenko, V. A. Solodukha, V. A. Gorushko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91, No 5. P. 1337–1341. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1866-0>.
5. Солодуха, В. А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных полевых MOSFET транзисторов / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. 2018. № 5. С. 99–103.
6. Красников, Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г. Красников. М.: Техносфера, 2002.
7. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2020. № 3. С. 55–64. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-55-64>.
8. Локализация атомов азота в структурах Si-SiO_2 / В. Б. Оджаев [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2022. Т. 39, № 11. С. 65–79. <https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-65-79>.

Поступила 10.03.2025

Принята в печать 17.04.2025

References

- 1 Doering R., Nishi Y. (2008) *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. NY, CRC Press Publ. <https://doi.org/10.1201/9781420017663>.
2. Anishchik V. M., Harushka V. A., Pilipenka U. A., Ponariadov V. V., Saladukha V. A. (2018) Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Process of Their Pyrogenic Oxidation. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2, 81–85 (in Russian).
3. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Zharin A., Gusev O. K., Vorobey R., Pantsialeyeu K., et al. (2019) Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Electro-Physical Properties of Silicon Dioxide, Obtained with Pyrogenous Oxidation. *High Temperature Material Processes*. 23 (3), 283–290. DOI: 10.1615/HighTempMatProc. 2019031122.
4. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A. (2018) Influence of Fast Thermal Treatment on the Electrophysical Properties of Silicon Dioxide. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 91 (5), 1337–1341. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1866-0>.
5. Solodukha V. A., Pilipenko V. A., Gorushko V. A. (2018) Influence of Rapid Thermal Treatment of the Gate Dielectric on the Parameters of Power Field MOSFET Transistors. *Doklady BGUIR*. (5), 99–103 (in Russian).
6. Krasnikov G. (2002) *Design and Technological Features of Submicron MOSFETs*. Moscow, Technosfera Publ. (in Russian).
7. Odzaev V. B., Panfilenka A. K., Pyatlitski A. N., Prasalovich U. S., Kovalchuk N. S., Soloviev Ya. A., et al. (2020) Influence of Nitrogen Ion Implantation on the Electrophysical Properties of the Gate Dielectric of Power MOSFETs. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. (3), 55–64. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-55-64> (in Russian).

8. Odzaev V., Prasalovich U., Pyatlitski A., Kovalchuk N., Soloviev Ya., Zhigulin D., et al. (2022) Localization of Nitrogen Atoms in Si–SiO₂ Structures. *Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 39 (11), 65–79. <https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-65-79> (in Russian).

Received: 10 March 2025

Accepted: 17 April 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Ковальчук Н. С., канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Пилипенко В. А., д-р техн. наук, проф., зам. нач. государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Соловьёв Я. А., д-р. техн. наук, доц., зав. отраслевой лабораторией новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Казинца, 121а
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 17 398-14-03
E-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Information about the authors

Kovalchuk N. S., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy of General Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Pilipenko V. A., Dr. Sci (Tech.), Professor, Deputy Head of the State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL”

Solovjov Ja. A., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121a
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 17 398-14-03
E-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich