

УДК 547.455:535.33/34:539.194

А. А. Шевченко¹, М. В. Королевич¹, В. М. Андрианов¹, О. А. Сергиевич²¹Белорусский государственный аграрный технический университет²Белорусский государственный технологический университет**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ОСНОВАНИЙ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Объектом исследований являлись экспериментальные образцы, сформованные и спеченные из кремниевых порошков, полученных из отходов монокристаллических пластин микроэлектронного производства. Исследованы особенности микроструктуры, физико-механические и теплофизические свойства экспериментальных образцов оснований гибридных интегральных микросхем (ГИМС) в зависимости от условий изготовления, показана принципиальная возможность их применения в качестве оснований ГИМС. Приведены преимущества использования импульсного пресования для получения образцов без связующего с относительной плотностью до 89%. Изучен фазовый состав экспериментальных образцов оснований гибридных интегральных микросхем в зависимости от параметров синтеза. Установлена сильная зависимость фазового состава от среды отжига (вакуум, воздух) и условий обработки (статические, динамические методы, температурный режим). Показано, что, варьируя технологическими режимами обработки и исходным составом, можно получать экспериментальные образцы оснований ГИМС с полупроводниковым либо диэлектрическим типом проводимости. На лабораторных образцах, изготовленных статическим способом при 1200°C в воздушной среде, шероховатость поверхности была 0,113 мкм. Показатели микротвердости составили 11,5 ГПа, коэффициента вязкости разрушения – 1,2 МПа · м^{1/2}, коэффициента теплопроводности – 25 Вт/(м · К), коэффициента термического расширения – 2,3 · 10⁻⁶ град⁻¹, удельного электрического сопротивления – от 10⁹ до 10¹² Ом · см.

Ключевые слова: кремний, порошки, гибридная интегральная микросхема, основание, подложка.

Для цитирования: Шевченко А. А., Королевич М. В., Андрианов В. М., Сергиевич О. А. Получение и исследование микроструктуры и свойств экспериментальных образцов оснований гибридных интегральных микросхем, полученных из отходов монокристаллического кремния // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 14–25.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-2.

A. A. Shevchenok¹, M. V. Korolevich¹, V. M. Andrianov¹, O. A. Sergievich²¹Belarusian State Agrarian Technical University²Belarusian State Technological University**OBTAINING AND STUDYING OF THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES
OF EXPERIMENTAL SAMPLES OF HYBRID INTEGRATED MICROCIRCUITS
BASES MANUFACTURED FROM WASTE MONOCRYSTALLINE SILICON**

The study focused on experimental samples molded and sintered from silicon powders obtained from single-crystal wafer waste from microelectronic manufacturing. The microstructural features, physical, mechanical, and thermal properties of the experimental hybrid integrated microcircuits (HIMC) base samples were examined depending on manufacturing conditions, demonstrating the fundamental feasibility of their use as bases for hybrid integrated microcircuits. The advantages of using pulse pressing to produce binder-free samples with a relative density of up to 89% are shown. The phase composition of experimental samples of hybrid integrated microcircuit bases was studied depending on the synthesis parameters. A strong dependence of the phase composition on the annealing environment (vacuum, air) and processing conditions (static, dynamic methods, temperature regime) was established. It has been shown that by varying the technological processing modes and the initial composition, it is possible to

obtain experimental samples of HIMS bases with a semiconductor or dielectric type of conductivity. On laboratory samples produced using a static method at 1200°C in an air environment, the surface roughness was 0.113 µm. Microhardness values are 11.5 GPa, fracture toughness coefficient is 1.2 MPa · m^{1/2}, thermal conductivity coefficient is 25 W/(m · K), thermal expansion coefficient is 2.3 · 10⁻⁶ deg⁻¹, specific electrical resistance is from 10⁹ to 10¹² Ohm · cm.

Keywords: silicon, powders, hybrid integrated microcircuit, base, substrate.

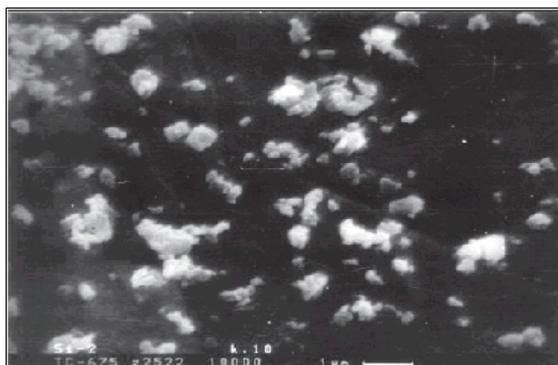
For citation: Shevchenok A. A., Korolevich M. V., Andrianov V. M., Sergievich O. A. Obtaining and studying of the microstructure and properties of experimental samples of hybrid integrated microcircuits bases manufactured from waste monocrystalline silicon. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 14–25 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-2.

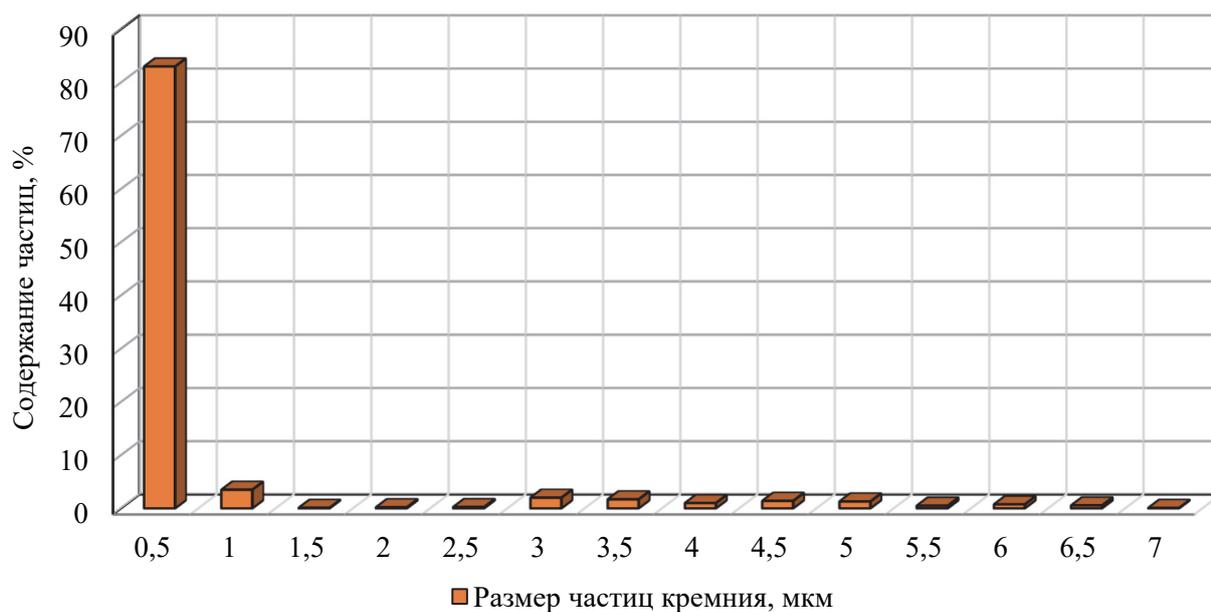
Введение. В настоящее время в качестве подложек для гибридных интегральных микросхем (ГИМС) в основном применяются керамические материалы благодаря их хорошим изоляционным свойствам. Вместе с тем к подложкам ГИМС, работающим в СВЧ-диапазоне, предъявляется ряд специфических требований. Идеальных материалов, обладающих полным набором необходимых свойств для изготовления подложек, не существует. В зависимости от выполняемых функций и условий работы ГИМС для подложек выбираются материалы, обладающие в большей мере необходимыми свойствами и удовлетворяющие комплексным требованиям. В идеальном случае подложка должна обладать малой удельной электропроводностью, химической инертностью, плоской и гладкой поверхностью, высокой диэлектрической прочностью, высокой удельной теплопроводностью, низкой стоимостью, малым разбросом по подложке значения диэлектрической постоянной, высокой химической и физической стойкостью при нагревании до 500°C в вакууме или на воздухе, температурным коэффициентом линейного расширения, по возможности, близким к температурному коэффициенту линейного расширения формируемых слоев [1–4]. В Республике Беларусь имеется много предприятий микроэлектронного профиля, применяющих монокристаллические кремниевые пластины для изготовления ГИМС и многокристалльных модулей. На этих предприятиях скопилось большое количество отходов данного материала, который пока нигде не используется. В нашей стране отсутствует производство оснований для изготовления гибридных интегральных микросхем и многокристалльных модулей. Необходимые керамические основания закупаются в России и Китае. Поэтому весьма актуальным представляется разработка отечественной технологии и организация производства качественных оснований, потребителями которых потенциально являются многие белорусские предприятия микроэлектронного профиля. Цель данной работы – исследование свойств кремниевых порошков, полученных из отходов микроэлектронного производства, изучение закономерностей процессов получения экспериментальных образцов оснований ГИМС и их свойств для дальнейшего использования как в различных металлургических процессах, так и при создании оснований ГИМС.

Основная часть. Исходное сырье представляло собой пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм, толщиной 0,5 мм. Вначале проводили предварительное измельчение с последующим отсевом осколков на сите 1 мм. Сырьем служил порошок, прошедший сито 1 мм. Дальнейшее измельчение выполняли с помощью вихревой струйной мельницы либо мельницы САНД с халцедоновыми чашами и шарами. С использованием данных сканирующей электронной микроскопии Mira (фирмы Tescan) и автоматического анализатора изображения Mini-Magiscan (фирмы Joyce Loebel) нами исследованы топография поверхности (рис. 1, а) и гистограммы распределения частиц измельченного порошка Si по размерам (рис. 1, б).

Установлено, что около 80% измельченных порошков заключено в интервале от 0 до 0,5 мкм. Минимальный размер частиц составил 68 нм, максимальный – до 6 мкм, средний размер частиц – 250 нм. Форма частиц наблюдалась преимущественно осколочная, иногда встречались частицы сферической формы.



а



б

Рис. 1. Топография поверхности (а) и гистограмма распределения частиц кремния по размерам (б) после измельчения в вихревой струйной мельнице

Насыпная плотность порошка равна $0,44 \text{ г/см}^3$, удельная поверхность $\sim 6,4 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для улучшения прочностных свойств экспериментальных образцов вносили в качестве легирующих добавок к измельченному кремнию стекла марок С7, С52 и аэросил марки А-175, имеющие наиболее близкие коэффициенты термического расширения (КТР) к кремнию. Изучали топографию, размер и форму частиц указанных легирующих добавок к измельченному кремнию. С целью равномерного распределения добавки использовали сухое смешивание измельченного кремния и легирующих добавок (до 20 об. %) в планетарной мельнице [5–8], поскольку мокрое смешивание указанных порошков вследствие их химической активности может приводить к их окислению [9, 10].

В интервале температур от комнатной до 900°C проведены термогравиметрические исследования кремниевых порошков, полученных измельчением отходов кремниевых пластин в вихревой мельнице, с легирующей добавкой 10 мас. % стекол марок С7 и С52 соответственно. Обнаружено, что при нагреве на воздухе до 900°C измельченных кремниевых порошков ($d \sim 250 \text{ нм}$) их вес всегда только возрастал, причем наиболее интенсивно начиная с температуры 725°C . Это, вероятно, связано с окислением кремния, фазовыми превращениями различных модификаций кремнезема, плотности которых неодинаковы. Для образцов на основе измельченного кремния с добавками 10 мас. % стекол марок С7 и С52 интенсивное увеличение веса начинается с более низких температур (600°C). Наряду с

этим наблюдались области, где вес убывал, причем более интенсивно для композиций с добавкой стекла марки С7, что, возможно, обусловлено газовыделением из стекол.

Исследованы закономерности прессования измельченных кремниевых порошков с различными легирующими добавками в интервале давлений 100–700 МПа (рис. 2).

Установлено, что традиционным статическим методом без добавления связующих невозможно спрессовать указанные композиции. С использованием связующего лучше прессовались композиции со стеклом марок С7 и С52, их плотность возрастала от 1,4 до 1,8 г/см³ с повышением давления до 700 МПа. Несколько хуже прессовались композиции с добавкой аэросила и исходный измельченный кремний со связующим (плотность менялась от 1,4 до 1,6 г/см³). Показаны преимущества использования импульсного прессования для получения образцов без связующего с относительной плотностью до 89% ($\rho \sim 2,15$ г/см³).

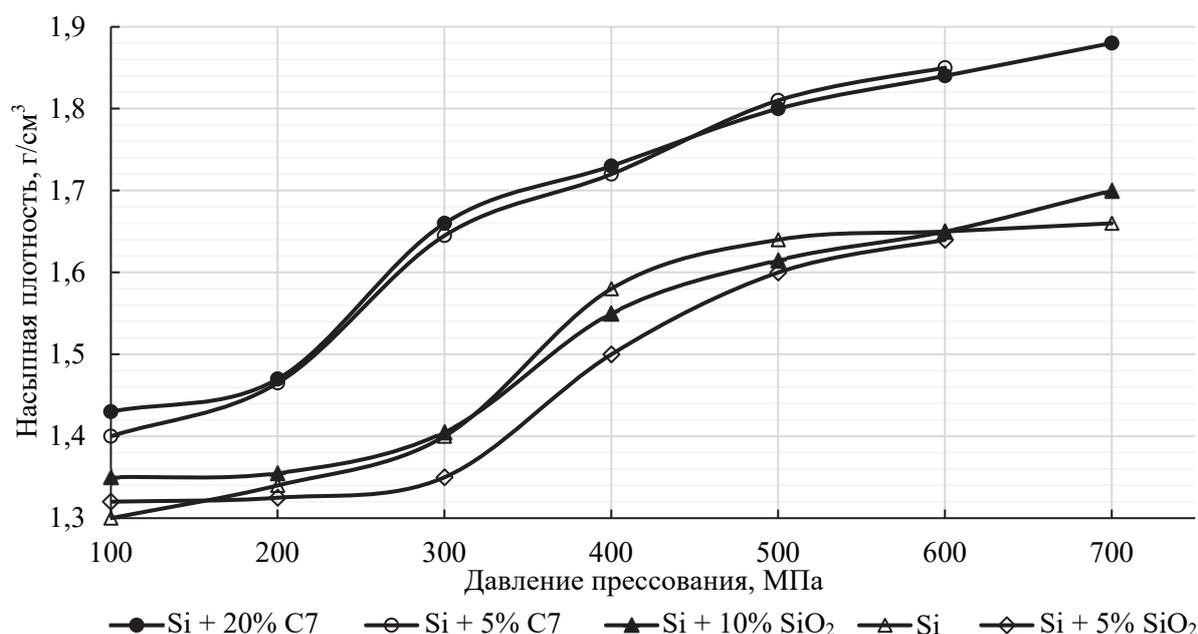


Рис. 2. Влияние давления статического прессования на плотность образцов измельченного кремния с различными легирующими добавками

Важной задачей при конструировании ГИМС представляется отвод тепла от большого количества близко расположенных на подложке тепловыделяющих компонентов, поэтому необходимы исследования и анализ теплофизических характеристик материала исследуемых экспериментальных образцов оснований. Определяющими теплоотвод факторами, которые могут оказывать существенное влияние в конечном итоге и на электрофизические характеристики, являются удельная теплопроводность, тепловое сопротивление и температурный коэффициент линейного расширения.

Исследование теплового расширения образцов оснований из субмикронного порошка кремния со стеклообразующими добавками было выполнено дилатометрическим методом (как на сырых, так и на спеченных образцах с помощью дифференциального дилатометра фирмы Netsch, работающего по методу сравнения изменения линейных размеров исследуемого материала и эталона). Исследуемые образцы имели прямоугольную форму длиной до 50 мм и с размером диагонали 4–6 мм. Измерения проводили в интервале температур от 20 до 1500°С в вакууме (10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст.) со скоростью нагрева от 0,2 до 200 град/мин. Результаты исследований по линейной усадке статически спрессованных образцов измельченного кремния в зависимости от температуры обработки при нагреве в вакууме (1300°С, 2 ч) в дилатометре позволили определить значение температурного коэффициента линейного расширения α_t для чистого кремния ($\sim 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

На основе dilatометрических исследований установлено, что наиболее интенсивно процесс усадки идет в диапазоне 600–900°C, начиная с 80 мин от начала спекания. После 160 мин спекания процесс усадки экспериментальных образцов существенно замедляется и примерно сравнивается с начальным этапом усадки (до 15 мин). Перегибы на кривой $\Delta L = f(T)$ свидетельствовали о возможной смене механизмов уплотнения экспериментальных образцов при нагреве в вакууме.

Кинетические закономерности спекания экспериментальных образцов для оснований ГИМС, полученных из отходов кремниевых пластин, изучали в интервале температур 1100–1300°C (вакуум) и 900–1550°C (воздух) (рис. 3–5).

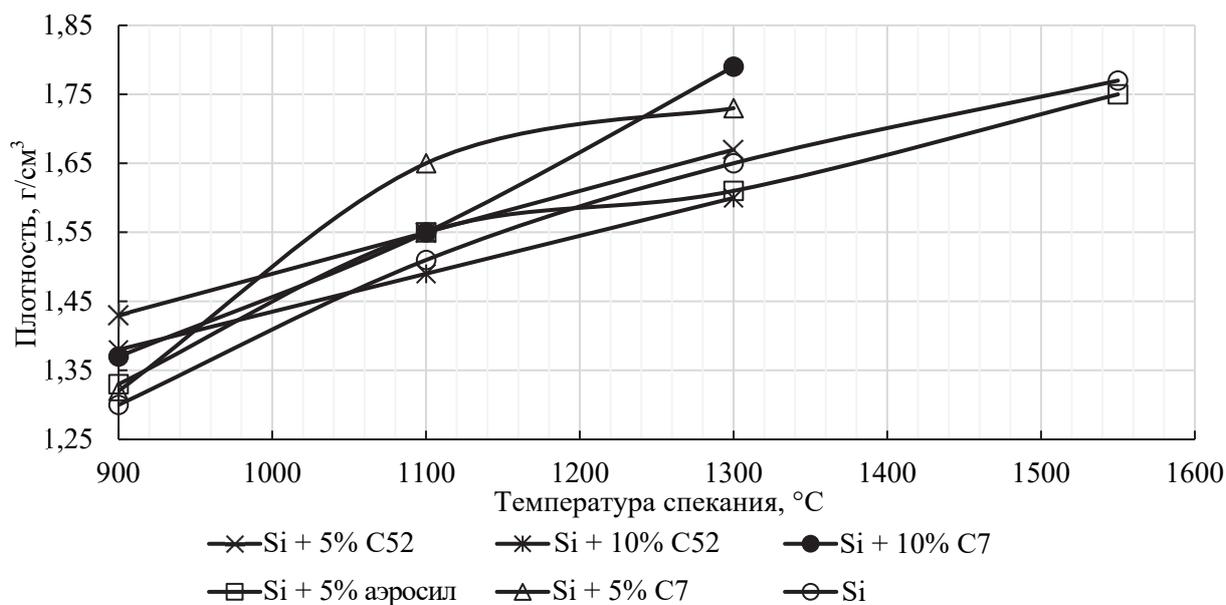


Рис. 3. Влияние температуры спекания на воздухе композиций на основе измельченного порошка кремния, полученных статическим методом из отходов пластин, на плотность спеченных экспериментальных образцов

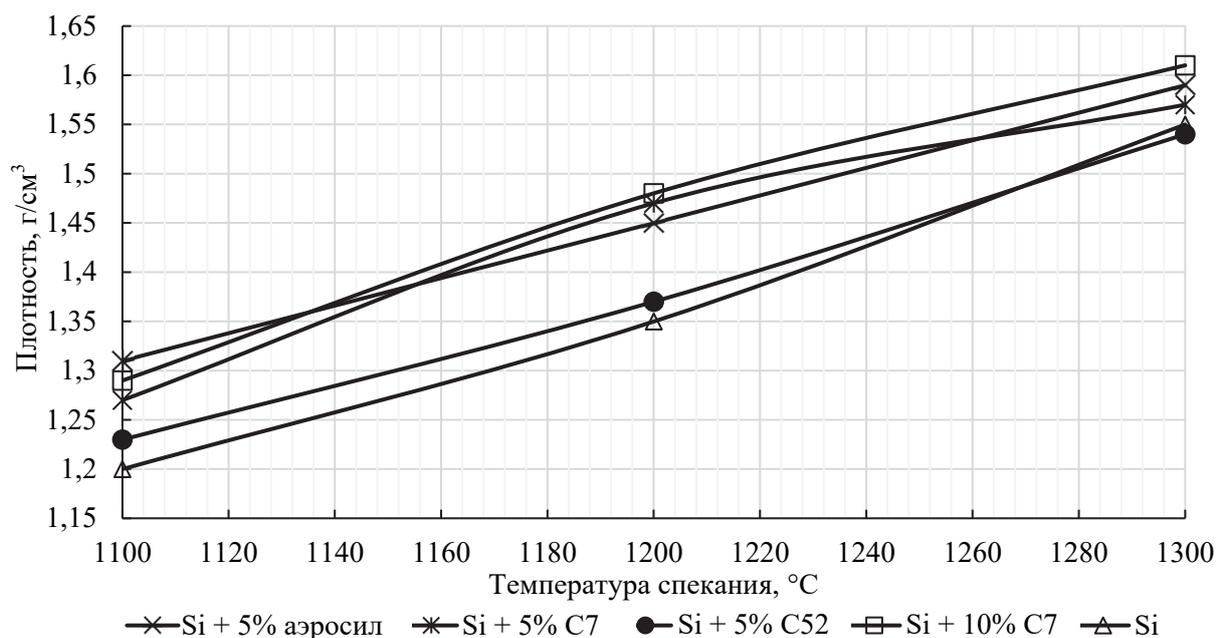


Рис. 4. Влияние температуры спекания в вакууме полученных статическим методом прессовок на их плотность

Использовали широко известный метод последовательных обжигов [11]. Спекание образцов осуществляли в камерной лабораторной электропечи ВТП 12/15 и в печи FSW-200/250-1750-ох/сп, варьируя время изотермической выдержки от 1 до 4 ч. Результаты исследования влияния температуры спекания на воздухе и в вакууме в интервале 900–1550°C на плотность, микроструктуру и фазовый состав экспериментальных образцов из измельченного кремния и кремния с добавкой стекла марок С7, С52 и аэросила представлены на рис. 3–6 и в табл. 1 [12, 13].

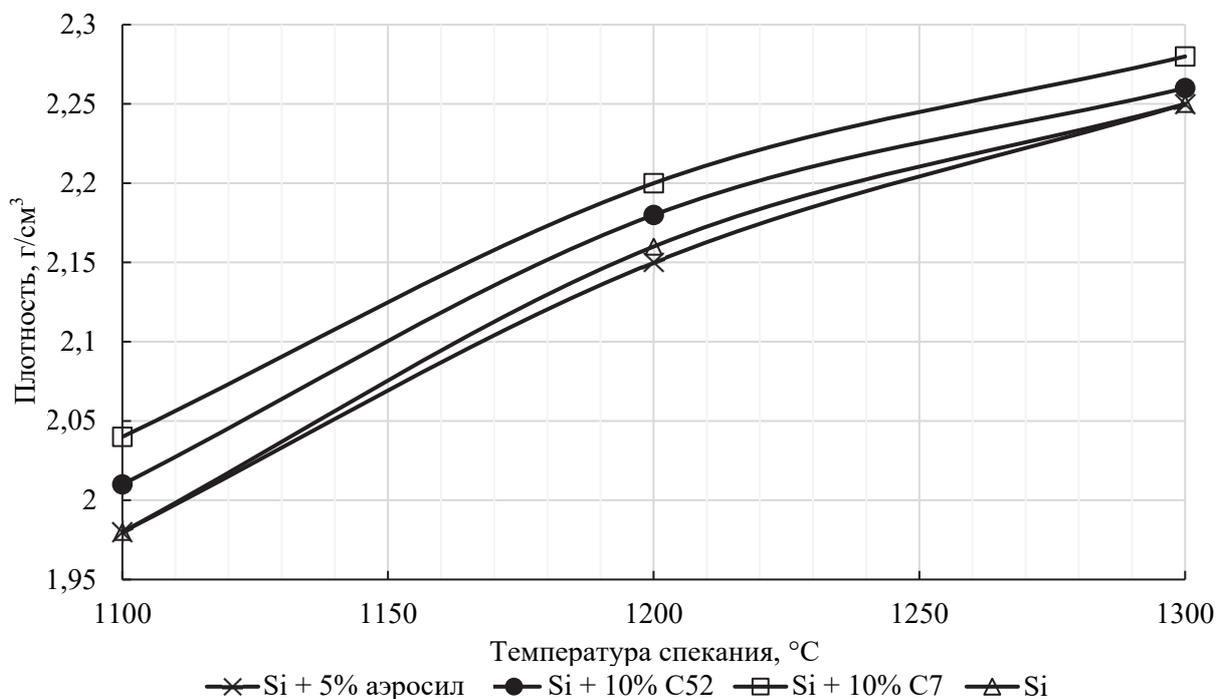


Рис. 5. Влияние температуры спекания на воздухе на плотность экспериментальных образцов на основе кремния, полученных импульсным методом

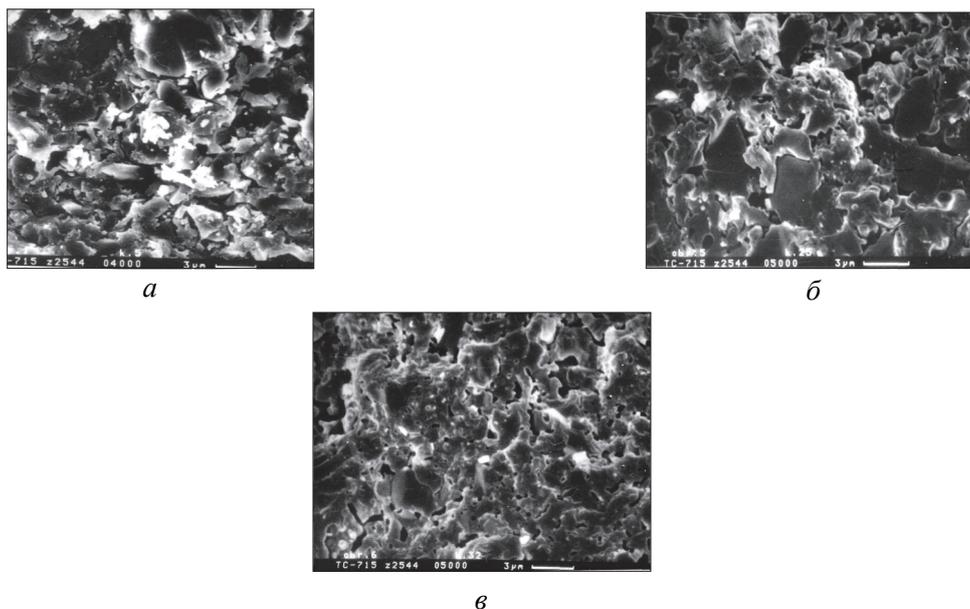


Рис. 6. Влияние режимов спекания на воздухе и содержания легирующей добавки сформованных импульсным прессованием образцов на их микроструктуру:
 а – Si (1100°C, 2 ч); б – Si + 5% С7 (1100°C, 2 ч); в – Si (1250°C, 3 ч)

Анализ данных на рис. 3–5 показывает, что наибольшей плотностью из всех исследованных составов обладают образцы, полученные импульсным прессованием и последующим спеканием на воздухе (1300°C, 2 ч, плотность – 2,25–2,28 г/см³). Следует отметить, что при температурах спекания выше 1300°C происходило разложение легирующих стекол в образцах, наблюдалось интенсивное газовыделение и пористость сильно возрастала. Поэтому образцы с добавками стекол спекали при температурах до 1300°C. Экспериментальные образцы с добавками стекол марки С7, полученные при температуре до 1300°C, обладали более высокой плотностью, чем с добавками стекол марки С52 и чистого кремния. С ростом концентрации добавки до 10% плотность экспериментальных образцов также увеличивалась.

Таблица 1. Фазовый состав экспериментальных образцов, полученных из измельченных отходов пластин кремния, после различных видов технологической обработки

Образец	Si CUB [27,1402]	Si TETR [39,973]	SiO ₂ TETR [31,1233]	SiO ₂ HEX [14,260] тридимит	SiO ₂ CUB [4,0359] кристобалит	SiO ₂ [34,717]	SiO ₂ CUB [27,605]	SiO ₂ TETR [4,379] кристобалит	SiO ₂ ROM [38,651]	SiO ₂ MON [38,360] моганит	SiO ₂ MON [18,1170] тридимит	SiO ₂ ORT [35,63]	SiO ₂ ORT [38,197]	SiO ₂ TETR [15,26] стишовит
Исходная пластина, монокр. Si	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Si, мол. в ВИМ-80	98,0	–	–	0,7	0,6	–	–	–	0,4	–	0,3	–	–	–
Si, мол., имп. + 1100°C, 2 ч (воздух)	54,8	0,7	–	–	–	10,6	30,2	–	0,9	–	–	–	–	–
Si, мол., стат. + 1100°C, 40 мин (вакуум)	95,3	–	–	0,7	0,5	–	–	–	1,1	–	0,1	–	–	0,8
Si, мол., стат. + 1450°C, 2 ч (воздух)	35,0	–	–	–	–	–	–	63,6	–	–	–	–	–	–
Si + 5% С7, стат. + 880°C, 2 ч (воздух)	77,8	–	1,1	–	–	–	–	7,3	–	–	9,3	–	4,4	–
Si + 5% С52, стат. + 880°C, 2 ч (воздух)	57,5	–	–	–	–	–	–	41,6	–	–	–	–	–	–
Si + 15% С52, имп. + 1100°C, 2 ч (воздух)	53,3	–	–	–	–	2,2	–	42,4	–	–	–	–	–	–

Примечание. монокр. – монокристаллический; мол. – молотый; имп. – импульсное прессование; стат. – статическое прессование.

Проведенный рентгенофазовый анализ (ДРОН-3) исходного материала кремниевых пластин, измельченного порошка кремния в вихревой мельнице и спеченных образцов в вакууме и на воздухе (табл. 1) показал сильную зависимость фазового состава от среды отжига (вакуум, воздух) и условий обработки (статические, динамические методы обработки, температурный режим). Порошок, полученный измельчением отходов кремниевых пластин в вихревой струйной мельнице ВИМ-80, содержал 98% Si кубической модификации. У образцов, спеченных в вакууме (1100°C, 40 мин), полученных статическим методом, содержалось 95% Si кубической модификации. При низких температурах спекания на воздухе (880°C, 2 ч) у статически спрессованных образцов Si + 5% С7 содержание кремния составляло около 78%. Увеличение температуры спекания на воздухе до 1450°C, 2 ч приводило к падению содержания Si кубической модификации до 35%. Таким образом, варьируя технологическими режимами обработки и исходным составом, можно получать экспериментальные образцы оснований ГИМС с полупроводниковым либо диэлектрическим типом проводимости.

Из всех исследованных образцов наибольшей пористостью обладал материал из измельченного кремния без добавок, спеченный в вакууме при 1300°C (пористость ~ 15%). Средний размер пор составлял 5–10 мкм. Поры достаточно равномерно распределены по объему. Средний размер спеченных кристаллов равен 10–20 мкм. Для образцов того же состава, спеченных на воздухе при 1330 и 1550°C, пористость не превышала 10 и 6% соответственно, размер пор был 1–2 мкм, а для спеченных кристаллитов – 1–3 мкм. Наибольшей плотностью обладали образцы, полученные импульсным прессованием и последующим спеканием на воздухе (1250°C, 3 ч) (относительная плотность $\rho_{отн} \sim 97\%$), а также образцы, полученные статическим прессованием и спеканием (1550°C, 2 ч) ($\rho_{отн} \sim 93\%$). Экспериментальные образцы с добавками стекол марки С7, полученные при температурах до 1300°C, обладали более высокой плотностью, чем образцы с добавками стекол марки С52 и чистого кремния. С увеличением концентрации добавки до 10% плотность экспериментальных образцов также возрастала.

Необходимость использования в качестве исходного материала субмикронных порошков обусловлена тем, что для работы в СВЧ-диапазоне одним из важных требований, предъявляемых к структуре подложек ГИМС, является малый размер зерен материала и неоднородностей состава. Увеличивающийся уровень интеграции приводит к требованию повышения коэффициента теплопроводности материала подложек [12, 13]. Поэтому нами проведено исследование теплофизических свойств экспериментальных образцов, полученных из отходов кремниевых пластин, в частности, определение коэффициента теплопроводности (табл. 2).

Таблица 2. Результаты измерения теплопроводности образцов на основе кремния, полученных из отходов пластин статическим методом

Тип образца и режим получения	Размеры, мм	Измеряемая сторона	Среднее значение теплопроводности, Вт/(м · К)
Si _м + 10% С7, 1200°C, 2 ч	10,2×2,20	Диск	12,86
Si _м , 1200°C, 2 ч	10,6×1,85	Диск	13,54
Si _м + 20% С7, 1200°C, 2 ч	10,6×1,70	Диск	14,00
Si _{кр} , 1200°C, 2 ч	10,4×1,70	Диск	19,90
Si _{кр} , 1200°C, 2 ч	10,5×2,10	Диск	24,73

Примечание. Si_м – дисперсность исходного порошка 0,1–0,2 мкм; Si_{кр} – дисперсность исходного порошка 1–3 мкм.

Для измерений использовался компьютерный измеритель теплопроводности КИТ-02Ц, который предназначен для определения теплопроводности плоских изделий из металлов, керамики и других материалов. Прибор обеспечивает измерение теплопроводности в диапазоне 10–600 Вт/(м · К).

Анализ экспериментальных данных показывает, что более высокий коэффициент теплопроводности имеют экспериментальные образцы, полученные из более крупного порошка кремния (дисперсностью 1–3 мкм, $\lambda \sim 20\text{--}25$ Вт/(м · К)). Образцы из ультрадисперсного порошка ($d \sim 0,1\text{--}0,2$ мкм) имеют более низкий коэффициент теплопроводности ($\lambda \sim 13\text{--}14$ Вт/(м · К)). Существенного влияния легирующие добавки стекла марки С7 (в интервале концентраций до 20 мас. %) не оказывали.

Известно [14, 15], что вклад в теплопроводность полупроводников вносят фононы и свободные электроны, а коэффициент теплопроводности определяется формулой

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot C \cdot l_{пр} \cdot v_{зв},$$

где C – теплоемкость, Дж/(м³ · К); $l_{пр}$ – средняя длина свободного пробега фононов (или электронов), нм; $v_{зв}$ – скорость распространения фононов, которая примерно равна скорости звука.

Коэффициент $1/3$ отражает тот факт, что фононы могут двигаться по всем трем направлениям.

Полученные нами более низкие значения теплопроводности (почти в 2 раза) для образцов из ультрадисперсного порошка ($d \sim 0,1-0,2$ мкм), чем для образцов из микронного порошка ($d \sim 1-3$ мкм), соответственно равные 13 и 25 Вт/(м · К), связаны с дополнительным рассеянием фононов на границах зерен у более мелкозернистого образца. Следует подчеркнуть, что более мелкозернистая структура оснований ГИМС очень перспективна в СВЧ-диапазоне, но в то же время более крупнозернистая структура ведет к более высоким значениям теплопроводности. Поэтому в каждом конкретном случае использования оснований ГИМС необходимо учитывать это. Однако следует отметить, что хотя полученное нами значение теплопроводности для образца из микронного порошка кремния ($d \sim 1-3$ мкм) без легирующих добавок, спеченного на воздухе при 1200°C , 2 ч, составило 25 Вт/(м · К). А это ниже значения теплопроводности монокристаллического кремния (83,8 Вт/(м · К)) [15], но сравнимо с теплопроводностью сапфира (18–27 Вт/(м · К)) и гораздо выше теплопроводности монокристалла кварца (12 Вт/(м · К)) и ситаллов (1–2 Вт/(м · К)).

Поскольку для подложек ГИМС требуется также высокая механическая прочность, необходимая для противодействия напряжениям, возникающим при сверлении и получении сложной формы, а также податливость царапанию, разрезанию, возможность разделения на модули, нами проведены измерения микротвердости и коэффициента трещиностойкости (вязкости разрушения) полученных экспериментальных образцов (табл. 3).

Полученные невысокие значения микротвердости ($H_v \sim 9,0-11,5$ ГПа) и коэффициента вязкости разрушения ($K_{1C} \sim 0,9-1,2$ МПа · м^{1/2}) близки к литературным данным и подтверждают известное положение о высокой хрупкости кремниевых материалов [14].

Таблица 3. Влияние технологических режимов изготовления и состава композиционного материала на основе измельченного кремния на его микротвердость (H_v) и вязкость разрушения (K_{1C})

Состав материала	Режим получения	Условия спекания (воздух)	H_v , ГПа	K_{1C} , МПа · м ^{1/2}
Si + 10% C7	Статический	1100°C, 2 ч + 1250°C, 3 ч	8,62	0,9
Si + 10% C7	Статический	1250°C, 3 ч	10,40	1,0
Si + 20% C7	Статический	900°C, 2 ч (двукратно)	10,41	1,2
Si + 20% C7	Статический	1100°C, 2 ч	10,65	1,2
Si + 20% C7	Статический	1250°C, 3 ч	9,57	0,9
Si	Импульсный	1100°C, 2 ч	8,77	0,9
Si	Импульсный	1250°C, 3 ч	9,76	1,0
Si + 10% C7	Импульсный	1100°C, 2 ч	11,50	0,9
Si + 10% C7	Импульсный	1250°C, 3 ч	10,10	1,0

Согласно нашим экспериментальным данным, максимальное значение микротвердости составило 11,5 ГПа для состава Si + 10% C7, полученного импульсным прессованием и последующим спеканием на воздухе (1100°C, 2 ч). Для статически спрессованных образцов максимальное значение микротвердости и коэффициента вязкости разрушения составило 10,65 ГПа и 1,2 МПа · м^{1/2} для состава Si + 20% C7 после спекания на воздухе (1100°C, 2 ч). Отмечено падение микротвердости экспериментальных образцов с добавками стекол и ростом температуры спекания от 1100 до 1250°C, что, вероятно, связано с превращениями, происходящими в стеклах при нагревании.

Заключение. В результате проведенных исследований выявлены закономерности формирования и спекания экспериментальных образцов оснований ГИМС, полученных из измельченных порошков отходов кремниевых монокристаллических пластин. Исследован фазовый состав экспериментальных образцов оснований ГИМС в зависимости от режимов

обработки. Установлена сильная зависимость фазового состава от среды отжига (вакуум, воздух) и условий обработки (статические, динамические методы, температурный режим). Показано, что, варьируя технологическими режимами обработки и исходным составом, можно получать экспериментальные образцы оснований ГИМС с полупроводниковым либо диэлектрическим типом проводимости.

Изучены особенности микроструктуры экспериментальных образцов из измельченного кремния и кремния с добавками стекол до 10% в зависимости от метода получения, среды и температуры. Оценены плотность, пористость, размер кристаллитов и их распределение.

Исследованы физико-механические свойства экспериментальных образцов (шероховатость, микротвердость, коэффициент вязкости разрушения, а также коэффициент теплопроводности, коэффициент термического расширения и удельное сопротивление) в зависимости от технологических режимов изготовления и состава композиции. На образцах, полученных статическим методом (1200°C, 2 ч, воздух), шероховатость составила $R_a \sim 0,113$ мкм, микротвердость – $H_v \sim 11,5$ ГПа, коэффициент вязкости разрушения – $K_{Ic} \sim 1,2$ МПа · м^{1/2}, коэффициент теплопроводности – 25 Вт/(м · К), коэффициент термического расширения – $2,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, удельное электрическое сопротивление – $\rho = 10^9$ – 10^{12} Ом · см. Показано, что использование в качестве исходного материала измельченных кремниевых порошков субмикронного диапазона позволяет получать высокоплотные мелкозернистые (до 1,0–1,5 мкм) подложки, которые перспективны для использования в СВЧ-диапазоне.

Список литературы

1. Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П. Материалы и элементы электронной техники: в 2 т. СПб.: Лань, 2016. Т. 2. 565 с.
2. Марков В. Ф., Мухамедзянов Х. Н., Маскаева Л. Н. Материалы современной электроники. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 272 с.
3. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. СПб.: Лань, 2008. 394 с.
4. Новые материалы для тонкопленочных функциональных элементов электронной техники / А. М. Гиро [и др.]. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 206 с.
5. Technology for production of nano-materials by fine milling of used ceramic targets and consolidation of powder in conditions of intense power treatment / A. F. Ilyuschenko [et al.] // Euro PM 2003. Europ. Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. Valencia, Spain, Oct. 20–22, 2003. Vol. 1. P. 147–153.
6. Получение наноразмерных и субмикронных порошков из отходов кремниевых пластин с использованием вихревой мельницы / В. А. Сокол [и др.] // Порошковая металлургия. 2004. Вып. 27. С. 240–247.
7. Магнитомягкие ферриты и техническая керамика для радиоэлектроники и приборостроения / С. Г. Барай [и др.] // Порошковая металлургия и защитные покрытия в машино- и приборостроении: сб. докл. Междунар. науч.-техн. семинара, провод. в рамках 9-й Междунар. выст. «Порошковая металлургия – 2003», Минск, 25 марта 2003 г. Минск, 2003. С. 42–63.
8. Получение методом механохимии ультрадисперсных порошков кремния и исследование их физико-химических свойств / А. А. Ковалевский [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 11. С. 667–673.
9. Ковалевский А. А., Шевченко А. А., Строгова А. С. Особенности окисления микро- и наноструктурных порошков кремния // Неорганические материалы. 2008. Т. 44, № 5. С. 1–5.
10. Kovalevskii A. A., Shevchenok A. A., Strogova A. A. Oxidation Behavior of Micro- and Nanostructured Silicon Powders // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore, 2009. P. 389–393.
11. Стрелов К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.

12. Современные керамические материалы различного назначения / С. Г. Барай [и др.] // Прогрессивные процессы порошковой металлургии: материалы Междунар. симп., Минск, 28–31 марта 2005 г. Минск, 2005. С. 89–110.

13. Шевченко А. А., Виолентий Д. Р. Закономерности спекания оснований гибридных интегральных микросхем, полученных из отходов кремниевых пластин // Наноструктурные материалы – 2004: Беларусь – Россия: сб. материалов III Междунар. семинара, Минск, 12–15 окт. 2004 г. Минск, 2004. С. 150–151.

14. Гнесин Г. Г., Дубок В. А., Ковенский И. И. Спеченные материалы для электротехники и электроники. М.: Металлургия, 1981. 344 с.

15. Игамбердыев Х. Т., Мамадалимов А. Т., Хабибуллаев П. К. Теплофизика кремния. Ташкент: Фан, 1990. 136 с.

References

1. Sorokin V. S., Antipov B. L., Lazareva N. P. *Materialy i elementy elektronnoy tekhniki* [Materials and elements of electronic equipment]: in 2 vol. St. Petersburg, Lan' Publ., 2016. Vol. 2. 565 p. (In Russian).

2. Markov V. F., Mukhamedzyanov Kh. N., Maskaeva L. N. *Materialy sovremennoy elektroniki* [Materials of modern electronics]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2014. 272 p. (In Russian).

3. Koledov L. A. *Tekhnologiya i konstruksii mikroskhem, mikroprotssorov i mikroborok* [Technology and design of microcircuits, microprocessors and microassemblies]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2008. 394 p. (In Russian).

4. Giro A. M., Goncharova O. V., Kurmashev V. I., Shevchenok A. A. *Novyye materialy dlya tonkoplenochnykh funktsional'nykh elementov elektronnoy tekhniki* [New materials for thin-film functional elements of electronic equipment]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1994. 206 p. (In Russian).

5. Ilyuschenko A. F., Savich V. V., Pilinevich L. P., Tumilovich M. V., Baray S. G., Shevchenok A. A. Technology for production of nano-materials by fine milling of used ceramic targets and consolidation of powder in conditions of intense power treatment. *Euro PM 2003. Europ. Congress and Ehibition on Powder Metallurgy*. Valencia, Spain, 2003, vol. 1, pp. 147–153 (In Russian).

6. Sokol V. A., Shevchenok A. A., Violentii D. R., Sorokin V. V. Obtaining nanoscale and submicron powders from silicon wafer waste using a vortex mill. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder Metallurgy], 2004, issue 27, pp. 240–247 (In Russian).

7. Baray S. G., Shevchenok A. A., Shelehina V. M., Prohorov O. A. Soft magnetic ferrites and technical ceramics for radio electronics and instrument making. *Poroshkovaya metallurgiya i zashchitnyye pokrytiya v mashino- i priborostroenii: sbornik dokladov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar, provodimogo v ramkakh 9-y Mezhdunarodnoy vystavki "Poroshkovaya metallurgiya – 2003"* [Powder metallurgy and protective coatings in mechanical engineering and instrument making: collection of reports from the International scientific and technical seminar, held within the framework of the 9th International Exhibition "Powder Metallurgy – 2003"]. Minsk, 2003, pp. 42–63 (In Russian).

8. Kovalevskii A. A., Strogova A. S., Shevchenok A. A., Kotov D. A., Gran'ko V. S. Obtaining ultra-dispersed silicon powders by mechanochemistry and studying their physicochemical properties. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystems technology], 2017, vol. 19, no. 11, pp. 667–673 (In Russian).

9. Kovalevskii A. A., Shevchenok A. A., Strogova A. S. Features of oxidation of micro- and nanostructured silicon powders. *Neorganicheskiye materialy* [Inorganic materials], 2008, vol. 44, no. 5, pp. 1–5 (In Russian).

10. Kovalevskii A. A., Shevchenok A. A., Strogova A. S. Oxidation Behavior of Micro- and Nanostructured Silicon Powders. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. Singapore, 2009, pp. 389–393 (In Russian).

11. Strelov K. K. *Teoreticheskiye osnovy tekhnologii ognepornykh materialov* [Theoretical foundations of refractory materials technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 480 p. (In Russian).

12. Baray S. G., Shevchenok A. A., Shelehina V. M., Prohorov O. A., Violentii D. R. Modern ceramic materials for various purposes. *Progressivnyye protsessy poroshkovoy metallurgii: materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Advanced powder metallurgy processes: proceedings of the International symposium]. Minsk, 2005, pp. 89–110 (In Russian).

13. Shevchenok A. A., Violentii D. R. Regularities of sintering of bases of hybrid integrated circuits obtained from waste silicon wafers. *Nanostrukturnyye materialy-2004: Belarus' – Rossiya: sbornik materialov III Mezhdunarodnogo seminara* [Nanostructured materials – 2004: Belarus – Russia: collection of materials of the III International seminar]. Minsk, 2004, pp. 150–151 (In Russian).

14. Gnesin G. G., Dubok V. A., Kovensky I. I. *Spechennyye materialy dlya elektrotekhniki i elektroniki* [Sintered materials for electrical engineering and electronics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 344 p. (In Russian).

15. Igamberdyev Kh. T., Mamadalimov A. T., Khabibullaev P. K. *Teplofizika kremniya* [Thermophysics of silicon]. Tashkent, Fan Publ., 1990. 136 p. (In Russian).

Информация об авторах

Шевченко Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99/1, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexshev56@mail.ru. SPIN-код: 1867-4405. Scopus ID: 6506256980. ORCID: 0000-0003-0102-9254.

Королевич Майя Васильевна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99/1, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korolevi@dragon.bas-net.by. Scopus ID: 6603273060.

Андрианов Виктор Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99/1, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.andrianov71@gmail.com. Scopus ID: 24781904700.

Сергиевич Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физико-химических методов и обеспечения качества. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: topochka.83@mail.ru. SPIN-код: 8684-8570. Scopus ID: 57195438045. ORCID: 0000-0001-8515-011X.

Information about the authors

Shevchenok Aleksandr Arkad'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Natural Sciences. Belarusian State Agrarian Technical University (99/1 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexshev56@mail.ru. SPIN code: 1867-4405. Scopus ID: 6506256980. ORCID: 0000-0003-0102-9254.

Korolevich Mayya Vasil'yevna – DSc (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor, the Department of Natural Sciences. Belarusian State Agrarian Technical University (99/1 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolevi@dragon.bas-net.by. Scopus ID: 6603273060.

Andrianov Viktor Mikhaylovich – DSc (Physics and Mathematics), Professor, the Department of Power Supply and Electrical Engineering. Belarusian State Agrarian Technical University (99/1 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.andrianov71@gmail.com. Scopus ID: 24781904700.

Sergievich Olga Aleksandrovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Physicochemical Methods and Quality Assurance. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: topochka.83@mail.ru. SPIN code: 8684-8570. Scopus ID: 57195438045. ORCID: 0000-0001-8515-011X.

Поступила 12.11.2025