

Пітак Я.М., Майстат М.С.

СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ SiC В КЕРАМІЦІ

Стаття присвячена вивченню структури, фізико-механічних властивостей та можливостей використання карбіду кремнію в кераміці. У даному дослідженні розглянуто нескінченне укладання тетраедра карбіду кремнію, яке формує різні політипи, такі як 15R, гексагональна (4H та 6H) та кубічна (3C) структури. Різні позначення, зокрема від Рамделла, використовуються для класифікації та вивчення цих політипів. Кристалічна структура карбіду кремнію має важливе значення для високотемпературного застосувань у порівнянні з традиційними напівпровідниками. Матеріал має високий модуль пружності, твердість та хімічно інертний. Фізико-механічні властивості карбіду кремнію роблять його ключовим матеріалом у сучасній технології. Зокрема, висока термічна стабільність та хімічна інертність сприяють його використанню при високих температурах та в агресивних хімічних середовищах. Широкий заперіний струм карбіду кремнію (2,4–3,2 eV) та його здатність поглинати ультрафіолетове та видиме світло відкривають перспективи застосування у оптичній електроніці та біосенсоріці. У сфері кераміки, карбід кремнію може використовуватися як ефективний поглинач електромагнітного випромінювання. Діелектрична проникність та термічна стабільність надають матеріалу переваги для створення легких та високотемпературних поглиначів. Дослідження показали, що композити з карбіду кремнію можуть забезпечувати значне поглинання електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот, а високий вміст легуючих елементів (N або Al) збільшує діелектричну проникність. Ці властивості роблять SiC перспективним матеріалом для застосувань у високотехнологічних галузях, включаючи оптичну електроніку, виробництво поглиблювачів електромагнітних хвиль та біосенсори. Подальше дослідження в цій області може розширити можливості використання карбіду кремнію у важливих технологічних сферах.

Ключові слова: кераміка, SiC, радіопоглинання, наноматеріали, структура, фізико-механічні властивості, діелектричні властивості, політопи, діелектрична проникність

Актуальність досліджень: Огляд досліджень щодо використання SiC в кераміці є важливим для розуміння його потенційних застосувань та переваг. Карбід кремнію знаходить застосування у великій кількості областей, включаючи високотемпературні, зносостійкі та напівпровідникові. Властивості карбіду кремнію, такі як термічна і хімічна інертність, висока твердість і механічна міцність, роблять його привабливим для використання у високотехнологічних індустріях, включаючи аерокосмічну, авіаційну та енергетичну галузі. Через постійний розвиток технологій сучасні дослідження у сфері матеріалознавства та технологій приводять до нових методів синтезу і обробки керамічних матеріалів, включаючи SiC. Огляд таких досліджень дозволяє слідкувати за новими технологіями та вдосконаленнями в цій галузі. Вивчення викликів, з якими стикаються дослідники у використанні карбіду кремнію в кераміці, а також вивчення перспектив для подальших вдосконалень, дозволяє розуміти, як можна оптимізувати цей матеріал для конкретного використання. Огляд досліджень дозволяє поглибити розуміння властивостей та можливостей SiC, що важливо для подальшого розвитку і оптимізації матеріалу для різноманітних цілей. Отже, огляд досліджень щодо використання карбіду кремнію в кераміці є актуальним, оскільки він сприяє розвитку цієї області та сприяє впровадженню нових технологій та матеріалів у промисловість і науку.

Метою статті є систематизація та аналіз актуальних досліджень щодо структури, властивості та використання SiC в кераміці.

Структура SiC. Структура карбіду кремнію представляє собою фундаментальний об'єкт дослідження, який привертає увагу науковців завдяки своїй унікальності та різноманітності структур, що виникають внаслідок одновимірності [1]. Зафіксовано понад 250 політипів SiC, кожен з яких відзначається особливим порядком атомів у кристалічній решітці [2]. Різні політипи, такі як 3C, 2H, 4H, 6H, 8H, 9R, 10H, 14H, 15R, 19R, 20H, 21H і 24R, представляють собою кубічні, гексагональні та ромбодрічні кристалографічні групи, що відкривають широкі можливості їх застосування у різних технологічних галузях [3–5].

Різноманітність політипів SiC обумовлена трьома основними кристалографічними групами: кубічною (C), гексагональною (H) та ромбодрічною (R) [3–5]. Цей матеріал, так само як і інші напівпровідникові матеріали, складається з тетраедрів, де атоми Si та C утворюють тетрадрічні комплекси та формує основу високої твердості та стабільності матеріалу подібного до алмазів та інших напівпровідників [6].

Тетрадрічні структури SiC визначаються їхнім взаємозв'язком і можуть бути розглянуті в контексті кількох ключових правил:

1) Послідовне слідування тетраедрів з тим самим індексом. Утворення тетраедричних структур у SiC включає в себе послідовне розташування тетраедрів з однаковим індексом. Це означає, що після кожного тетраедра того самого варіанта слідує інший тетраедр із тим самим індексом.

2) Послідовне слідування тетраедрів з різними індексами. Тетраедричні структури також можуть включати послідовне розташування тетраедрів з різними індексами. Це означає, що тетраедр слідує за варіантом з іншим індексом, утворюючи різноманітні структурні укладення.

У матеріалі SiC спостерігається унікальне явище нескінченного укладання тетраедрів, що формує різні політипи [6–9]. Перший виявлений тип структури 15R характеризується повторенням подвійних шарів Si-C після кожних 15 шарів, і позначений як «Тип I». Другий тип — гексагональна структура з повтореннями після шестишарових структур та класифікується як «Тип II». Третій тип, «Тип III», включає структуру з повторюваними чотирма шарами, тоді як четвертий тип це кубічна структура, позначена як «Тип IV».

Для опису цих політипів використовуються різні позначення, зокрема, ті, які були розроблені Рамсделлом [10]. Важливо відзначити, що ці позначення не враховують розрізнення між шарами, що складаються з неукладених тетраедрів, та тими, що містять вкладені тетраедри. Подвійні шари Si-C враховуються в представленні, а політип відрізняється порядком періодичності 'n' та решіткою Брейве кристала.

Значущість карбіду кремнію підсилюється його використанням у високотемпературних умовах, що відзначається збільшенням значенням порівняно з традиційними напівпровідниками [11]. Важливі властивості SiC порівняно з традиційним напівпровідником Si [12] представлені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння властивостей політипів карбіду кремнію з іншими кремнієвими матеріалами

Кількість	Si	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC
Теплопровідність ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \text{К}^{-1}$) при 300 К, легована $\sim 10^{17} \text{см}^{-3}$	1,5	3,2	3,7	4,9
Концентрація власних носіїв при 300 К (см^3)	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Рухливість електронів ($\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	1400	800	1000	400
Швидкість насичення ($\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$) паралельно осі c	$1,0 \cdot 10^7$	–	$2,0 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$
Рухливість дірок ($\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	471	40	115	101
Структури Шоттки ϵ_s	11.7	9.72	–	9.66

SiC володіє ковалентно зв'язаною сполукою IV–IV, що характеризується 1D поліморфіями, де кожний атом C або Si оточений чотирма атомами Si або C у тетраедричних зв'язках sp^3 -гібридації. Кристалічна структура SiC складається з подвійних шарів атомів Si і C, які утворюють щільно упаковану структуру. Це призводить до виникнення різних кристалографічних форм, відомих як політипи [13,14].

Позначення політипу, введена Рамсделлом у 1947 році, позначається як nX, де 'X' та представляє решітку Брейве (C для кубічної, H для гексагональної і R для ромбоедричної), а 'n' вказує на різні подвійні шари в одному періоді укладання решітки [10]. Розташування атомів у кристалічних структурах, таких як кубічні 3C, гексагональні 4H і 6H, а також ромбоедричні R, представлені загальними політипами. У цих структурах A, B і C позначають позиції укладання шарів C-Si [15] (рис. 1).

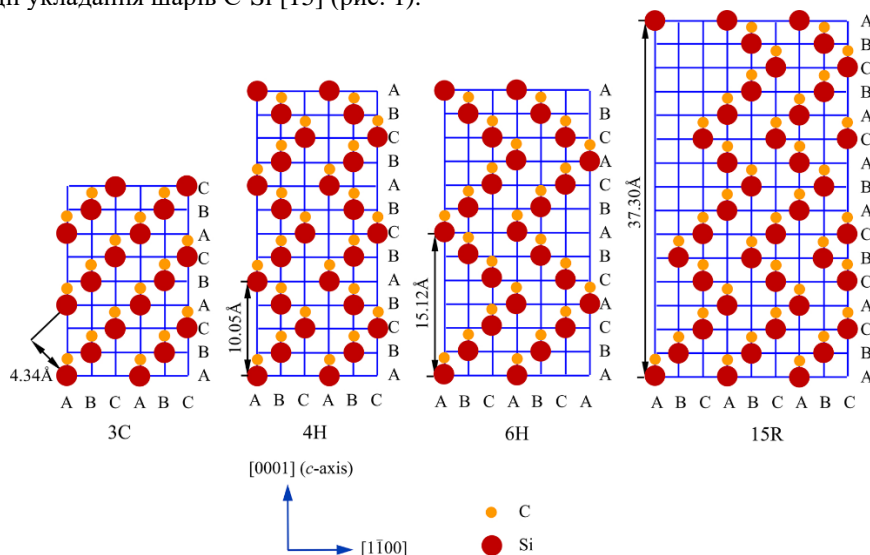


Рисунок 1 - Подвійний шар послідовностей укладання 3C-, 4H-, 6H- і 15R-SiC [15]

Електричні, оптичні і теплові властивості SiC залежать від політипу, що робить контроль за бажаним політипом важливим для синтезу значущих наноматеріалів [16]. Різні політипи SiC, такі як кубічні, гексагональні і ромбоедричні, визначають особливості його властивостей та можливості застосування в різних технологічних сферах.

Фізико-механічні властивості SiC. Карбід кремнію відіграє важливу роль у сучасних технологіях, завдяки своїм винятковим характеристикам, таким як висока щільність, міцність та термомеханічна стійкість.

Кристалічний SiC має високий модуль пружності, становлячи 424 ГПа, високу твердість (45,8 ГПа), низький коефіцієнт тертя (0,17) та високий опір [17].

Карбід кремнію описується як хімічно інертний керамічний матеріал, що робить його придатним для використання в хімічно активних середовищах навіть при високих температурах, тоді як термічна стабільність аморфного керамічного матеріалу обмежується 250 °C [18].

Також слід зазначити широкий заірний струм SiC, який коливається від 2,4 до 3,2 еВ, залежно від політипу який визначає його електричні характеристики та чутливість до зовнішніх впливів. Зазначена широка шкала значень призводить до варіацій у чутливості напівпровідника до зовнішніх факторів і високий коефіцієнт термічної провідності роблять його придатним для роботи в екстремальних умовах реакцій, що збільшує його застосування в різних технологічних областях. Наприклад, для 4H-SiC ширина заірного струму становить 3,26 еВ, що сприяє зменшенню рекомбінації електронів і дірок під час термічних або фотохімічних реакцій, а коефіцієнт термічної провідності перевищує дорівнює 3,7, що далеко перевершує цей показник для напівпровідника Si зі значенням 1,5. Це робить SiC особливо ефективним в енергетичних застосуваннях, де важливе відведення тепла.

Крім того, показник заломлення SiC суттєво вищий порівняно з іншими матеріалами, такими як алмаз. Висока заломлююча здатність сприяє поліпшенню оптичних властивостей і може розширювати області застосування матеріалу в електроніці та оптиці. Порівняння властивостей політипів карбиду кремнію з іншими кремнієвими матеріалами наведені в Таблиці 2 [19].

Таблиця 2

Порівняння властивостей політипів карбиду кремнію з іншими кремнієвими матеріалами

Властивості	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	Алмаз
Ширина заірної зони (eV) ($T < 5$ K)	1,12	1,43	2,40	3,02	3,26	5,45
Теплопровідність ($Вт \cdot см^{-1} K^{-1}$)	1,5	0,5	3,2	4,9	3,7	6-20
Швидкість дрейфу насичених електронів (10^7 $см \cdot с^{-1}$)	1,0	2,0	2,5	2,0	2,0	1,5
Діелектрична проникність	11,8	12,8	9,7	9,7	9,7	5,7
Поле пробою (МВ $см^{-1}$)	0,25	0,3	2,12	2,5	2,2	1-10
Фізична стабільність	Добре	Задовільно	Відмінно	Відмінно	Відмінно	Відмінно

SiC в кераміці. Використання карбиду кремнію (SiC) в кераміці має широкий потенціал, особливо в контексті матеріалів, що використовуються для поглинання електромагнітного випромінювання Традиційні матеріали, такі як ферит та карбонілове залізо, зазвичай використовуються для створення магнітних поглиначів, але вони мають свої недоліки, такі як вага та схильність до корозії і, як правило, втрачають здатність поглинати мікрохвилі при високій температурі [20–23]. Матеріали на основі SiC можуть слугувати альтернативою, оскільки вони можуть спричинити діелектричні втрати, мають високу термічну стабільність, хімічну інертність та низьку щільність. Ці характеристики роблять їх відмінними для створення легких та високотемпературних поглиначів електромагнітного випромінювання.

Науковці Chiu та ін. вивчали властивості поглинати електромагнітне випромінювання на 2-мм шарі композиту b-SiC нанодротів/епоксиду в частотному діапазоні від 2 до 40 ГГц [24]. Виявлено, що композит, що містить 35% нанодротів SiC, продемонстрував двочастотне поглинання з мінімальними втратами на відбиття – 31,7 дБ і –9,8 дБ на 8,3 і 2,7 ГГц відповідно, але, чистий епоксид або композит із 15 відсотками наночастинок SiC/епоксиду не мали значного впливу на поглинання електромагнітних хвиль. Діелектрична мережа нанодротів в матриці та електрична поляризація були основними факторами високих властивостей поглинання електромагнітного випромінювання. Велика кількість міжфазної електричної поляризації була обумовлена високим співвідношенням поверхні до об'єму наноструктур. Вчені Wu та ін. продемонстрували, що 3-мм шар 30% b-SiC нанодротів/силіконового композиту може досягти мінімальної втрати на відбиття -17,4 дБ при 11,2 ГГц і ширині смуги поглинання 2,5 ГГц з втратами на відбиття нижче -10 дБ (понад 90% поглинання електромагнітних хвиль) [25].

Вплив на поглинання ЕМ хвиль наноструктурою SiC може бути додатково покращений введенням N або Al [26–28]. Li та ін. досліджували вплив легування Al на діелектричні властивості b-SiC наночастинок вбудованих у парафін, в діапазоні частот від 8,2 до 12,4 ГГц [26]. Дослідження показало, що реальна частина ϵ_0 та уявна частина ϵ_{00} комплексної діелектричної проникності наночастинок SiC значно збільшилась зі зростанням вмісту Al, що свідчить про покращену ефективність електромагнітного випромінювання. Високі значення ϵ_0 та ϵ_{00} були викликані релаксаційною поляризацією та втратами зв'язаних дірок внаслідок заміщення Al за Si в кристалічній ґратці SiC. Zhao та ін. вивчали композити з N-легованими SiC наночастинами, заповненими у парафіні в діапазоні частот від 8,2 до 18 ГГц [28]. Було виявлено, що шар 2,96 мм з 7 відсотками ваги N-легованих SiC наночастинок/парафіновий композит може досягти втрати відбиття нижче -10 дБ для частот від 9,8 до 15,8 ГГц та мінімальне значення -63,41 дБ при 12,17 ГГц.

Крім того, наноструктури SiC можуть бути включені в інші матеріали, наприклад в багатошарові вуглецеві нанотрубки (БШГВ), щоб утворити багатокомпонентні поглиблювачі [29–31]. Zhao та ін. виготовили одновірні пористі нанокompозити БШГВ/SiC шляхом реакції на місці між Si та БШГВ, та продемонстрували, що шар композиту з БШГВ, покритий наночастинами SiC в парафіні, товщиною від 1,6 до 2,2 мм, може досягти 99% поглиблення хвиль ЕМ в діапазоні частот від 10,6 до 18 ГГц [26]. Відмінна ефективність була приписана

багатодіелектричній поляризації, яка виникає від пористої структури нанокompatитів, інтерфейсів між наночастинками SiC та БШГВ, а також меж гранул наночастинки SiC.

Також експериментально доказано, що коефіцієнти пропускання та відбиття досліджуваних зразків у діапазоні 1-67 ГГц зростають із збільшенням концентрації електропровідної домішки SiC. При цьому збільшується поглинання мікрохвильового випромінювання, і кераміку можна розглядати як радіопоглинальний матеріал [32].

Висновки. У роботі розглянута структура, фізико-механічні властивості карбиду кремнію, а також його використання в кераміці, зокрема для створення поглиначів електромагнітної випромінювання. SiC, як ковалентно зв'язана сполука IV–IV, IV–IV, характеризується 1D поліморфією виявляє нескінченну структурну різноманітність, представлену політипами. Кожен політип визначається типом та кількістю шарів, що утворюють кристалічну решітку. Розрізнення між ними базується на порядку періодичності укладання та решітці Брейва (С для кубічної, H для гексагональної і R для ромбодричної). Перші чотири типи політипів (Тип I–Тип IV) мають унікальні структури, що робить їх важливими для досліджень та застосувань. Модуль пружності (424 ГПа), твердість (45,8 ГПа), низький коефіцієнт тертя (0,17) та хімічна інертність дозволяють розглядати SiC як перспективний компонент для високотехнологічних виробів. Карбід кремнію являється перспективним матеріалом для створення радіопоглинаючої кераміки.

Література

1. Xie J. et al. Ultrahigh strength of three-dimensional printed diluted magnesium doping wollastonite porous scaffolds // *Mrs Communications*. – 2015. – Т. 5. – №. 4. – С. 631-639.
2. Li B. et al. Synthesis and characterization of nanostructured silicon carbide crystal whiskers by sol–gel process and carbothermal reduction // *Ceramics International*. – 2014. – Т. 40. – №. 8. – С. 12613-12616.
3. Pensl G., Choyke W. J. Electrical and optical characterization of SiC // *Physica B: Condensed Matter*. – 1993. – Т. 185. – №. 1-4. – С. 264-283.
4. Stein R. A., Lanig P., Leibenzeder S. Influence of surface energy on the growth of 6H- and 4H-SiC polytypes by sublimation // *Materials Science and Engineering: B*. – 1992. – Т. 11. – №. 1-4. – С. 69-71.
5. Stein R. A., Lanig P. Control of polytype formation by surface energy effects during the growth of SiC monocrystals by the sublimation method // *Journal of crystal growth*. – 1993. – Т. 131. – №. 1-2. – С. 71-74.
6. Baumhauer H. VII, About the crystals of the carborundum // *Z. Kristallogr. Cryst. Mater.* – 1912. – Т. 50 – С. 33–39.
7. Kleber W., Verma A. R., Krishna P. Polymorphism and polytypism in crystals // *John Wiley and Sons, Inc.*, – New York-London-Sydney – 1966 – С. 665–666.
8. Jepps N. W., Page T. F. Polytypic transformations in silicon carbide // *Progress in crystal growth and characterization*. – 1983. – Т. 7. – №. 1-4. – С. 259-307.
9. Basavalingu B. et al. Decomposition of silicon carbide in the presence of organic compounds under hydrothermal conditions // *Carbon*. – 2001. – Т. 39. – №. 11. – С. 1763-1766.
10. Ramsdell L. S. Studies on silicon carbide // *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. – 1947. – Т. 32. – №. 1-2. – С. 64-82.
11. Barrett D. L. et al. Growth of large SiC single crystals // *Journal of Crystal Growth*. – 1993. – Т. 128. – №. 1-4. – С. 358-362.
12. Casady J. B., Johnson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review // *Solid-State Electronics*. – 1996. – Т. 39. – №. 10. – С. 1409-1422.
13. Fisher G. R., Barnes P. Towards a unified view of polytypism in silicon carbide // *Philosophical Magazine B*. – 1990. – Т. 61. – №. 2. – С. 217-236.
14. Ortiz A. L. et al. The prolific polytypism of silicon carbide // *Journal of Applied Crystallography*. – 2013. – Т. 46. – №. 1. – С. 242-247.
15. Wu R. et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials // *Progress in Materials Science*. – 2015. – Т. 72. – С. 1-60.
16. Bhatnagar M., Baliga B. J. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices // *IEEE Transactions on electron devices*. – 1993. – Т. 40. – №. 3. – С. 645-655.
17. Coletti C. et al. Biocompatibility and wettability of crystalline SiC and Si surfaces // *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – IEEE, 2007. – С. 5849-5852.
18. Mahmoodi M., Ghazanfari L. Fundamentals of biomedical applications of biomorphic SiC. – INTECH Open Access Publisher, 2011.
19. Han R. et al. Development of bulk SiC single crystal grown by physical vapor transport method // *Optical materials*. – 2003. – Т. 23. – №. 1-2. – С. 415-420.
20. Pullar R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics // *Progress in Materials Science*. – 2012. – Т. 57. – №. 7. – С. 1191-1334.
21. Kimura S. et al. Electromagnetic wave absorption properties of carbonyl iron-ferrite/PMMA composites fabricated by hybridization method // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2007. – Т. 312. – №. 1. – С. 181-186.
22. Yalçın O., Bayrakdar H., Özüm S. Spin-flop transition, magnetic and microwave absorption properties of α -Fe₂O₄ spinel type ferrite nanoparticles // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2013. – Т. 343. – С. 157-162.
23. Mehdipour M., Shokrollahi H. Comparison of microwave absorption properties of SrFe₁₂O₁₉, SrFe₁₂O₁₉/NiFe₂O₄, and NiFe₂O₄ particles // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Т. 114. – №. 4.

24. Chiu S. C., Yu H. C., Li Y. Y. High electromagnetic wave absorption performance of silicon carbide nanowires in the gigahertz range //The Journal of Physical Chemistry C. – 2010. – T. 114. – №. 4. – C. 1947-1952.
25. Wu R. et al. Molten-salt-mediated synthesis of SiC nanowires for microwave absorption applications //CrystEngComm. – 2013. – T. 15. – №. 3. – C. 570-576.
26. Li Z. et al. Preparation and characterization of aluminum-doped silicon carbide by combustion synthesis //Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – T. 91. – №. 8. – C. 2607-2610.
27. Huan J., Zhou W., Fa L. Synthesis and dielectric properties of nano Si/C/N powders //Journal of Materials Chemistry. – 2002. – T. 12. – №. 8. – C. 2459-2462.
28. Zhao D. L., Luo F., Zhou W. C. Microwave absorbing property and complex permittivity of nano SiC particles doped with nitrogen //Journal of alloys and compounds. – 2010. – T. 490. – №. 1-2. – C. 190-194.
29. Zhu H. L. et al. In situ synthesis of one-dimensional MWCNT/SiC porous nanocomposites with excellent microwave absorption properties //Journal of Materials Chemistry. – 2011. – T. 21. – №. 35. – C. 13581-13587.
30. Zhu H. L. et al. Microwave absorption properties of MWCNT-SiC composites synthesized via a low temperature induced reaction //AIP advances. – 2011. – T. 1. – №. 3.
31. Xie S. et al. Microwave absorption properties of in situ grown CNTs/SiC composites //Journal of alloys and compounds. – 2012. – T. 520. – C. 295-300.
32. Grygoruk V. I. et al. Microwave Electrodynamic Characteristics of Ceramic Materials //J. Nano- Electron. Phys. – 2022. – T. 14 – №. 1.

References

1. Xie J. et al. Ultrahigh strength of three-dimensional printed diluted magnesium doping wollastonite porous scaffolds //Mrs Communications. – 2015. – T. 5. – №. 4. – S. 631-639.
2. Li B. et al. Synthesis and characterization of nanostructured silicon carbide crystal whiskers by sol-gel process and carbothermal reduction //Ceramics International. – 2014. – T. 40. – №. 8. – S. 12613-12616.
3. Pensl G., Choyke W. J. Electrical and optical characterization of SiC //Physica B: Condensed Matter. – 1993. – T. 185. – №. 1-4. – S. 264-283.
4. Stein R. A., Lanig P., Leibenzeder S. Influence of surface energy on the growth of 6H-and 4H-SiC polytypes by sublimation //Materials Science and Engineering: B. – 1992. – T. 11. – №. 1-4. – S. 69-71.
5. Stein R. A., Lanig P. Control of polytype formation by surface energy effects during the growth of SiC monocrystals by the sublimation method //Journal of crystal growth. – 1993. – T. 131. – №. 1-2. – S. 71-74.
6. Baumhauer H.VII, About the crystals of the carborundum //Z. Kristallogr. Cryst. Mater. – 1912. – T.50 – S. 33–39.
7. Kleber W., Verma A. R., Krishna P. Polymorphism and polytypism in crystals //John Wiley and Sons, Inc., – New York-London-Sydney – 1966 – S. 665–666.
8. Jepps N. W., Page T. F. Polytypic transformations in silicon carbide //Progress in crystal growth and characterization. – 1983. – T. 7. – №. 1-4. – S. 259-307.
9. Basavalingu B. et al. Decomposition of silicon carbide in the presence of organic compounds under hydrothermal conditions //Carbon. – 2001. – T. 39. – №. 11. – S. 1763-1766.
10. Ramsdell L. S. Studies on silicon carbide //American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials. – 1947. – T. 32. – №. 1-2. – S. 64-82.
11. Barrett D. L. et al. Growth of large SiC single crystals //Journal of Crystal Growth. – 1993. – T. 128. – №. 1-4. – S. 358-362.
12. Casady J. B., Johnson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review //Solid-State Electronics. – 1996. – T. 39. – №. 10. – S. 1409-1422.
13. Fisher G. R., Barnes P. Towards a unified view of polytypism in silicon carbide //Philosophical Magazine B. – 1990. – T. 61. – №. 2. – S. 217-236.
14. Ortiz A. L. et al. The prolific polytypism of silicon carbide //Journal of Applied Crystallography. – 2013. – T. 46. – №. 1. – S. 242-247.
15. Wu R. et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials //Progress in Materials Science. – 2015. – T. 72. – S. 1-60.
16. Bhatnagar M., Baliga B. J. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices //IEEE Transactions on electron devices. – 1993. – T. 40. – №. 3. – S. 645-655.
17. Coletti C. et al. Biocompatibility and wettability of crystalline SiC and Si surfaces //2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2007. – S. 5849-5852.
18. Mahmoodi M., Ghazanfari L. Fundamentals of biomedical applications of biomorphic SiC. – INTECH Open Access Publisher, 2011.
19. Han R. et al. Development of bulk SiC single crystal grown by physical vapor transport method //Optical materials. – 2003. – T. 23. – №. 1-2. – S. 415-420.
20. Pullar R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics //Progress in Materials Science. – 2012. – T. 57. – №. 7. – S. 1191-1334.
21. Kimura S. et al. Electromagnetic wave absorption properties of carbonyl iron-ferrite/PMMA composites fabricated by hybridization method //Journal of magnetism and magnetic materials. – 2007. – T. 312. – №. 1. – S. 181-186.

22. Yalçın O., Bayrakdar H., Özüm S. Spin-flop transition, magnetic and microwave absorption properties of α -Fe₂O₄ spinel type ferrite nanoparticles //Journal of magnetism and magnetic materials. – 2013. – T. 343. – S. 157-162.
23. Mehdipour M., Shokrollahi H. Comparison of microwave absorption properties of SrFe₁₂O₁₉, SrFe₁₂O₁₉/NiFe₂O₄, and NiFe₂O₄ particles //Journal of Applied Physics. – 2013. – T. 114. – №. 4.
24. Chiu S. C., Yu H. C., Li Y. Y. High electromagnetic wave absorption performance of silicon carbide nanowires in the gigahertz range //The Journal of Physical Chemistry C. – 2010. – T. 114. – №. 4. – S. 1947-1952.
25. Wu R. et al. Molten-salt-mediated synthesis of SiC nanowires for microwave absorption applications //CrystEngComm. – 2013. – T. 15. – №. 3. – S. 570-576.
26. Li Z. et al. Preparation and characterization of aluminum-doped silicon carbide by combustion synthesis //Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – T. 91. – №. 8. – S. 2607-2610.
27. Huan J., Zhou W., Fa L. Synthesis and dielectric properties of nano Si/C/N powders //Journal of Materials Chemistry. – 2002. – T. 12. – №. 8. – S. 2459-2462.
28. Zhao D. L., Luo F., Zhou W. C. Microwave absorbing property and complex permittivity of nano SiC particles doped with nitrogen //Journal of alloys and compounds. – 2010. – T. 490. – №. 1-2. – S. 190-194.
29. Zhu H. L. et al. In situ synthesis of one-dimensional MWCNT/SiC porous nanocomposites with excellent microwave absorption properties //Journal of Materials Chemistry. – 2011. – T. 21. – №. 35. – S. 13581-13587.
30. Zhu H. L. et al. Microwave absorption properties of MWCNT-SiC composites synthesized via a low temperature induced reaction //AIP advances. – 2011. – T. 1. – №. 3.
31. Xie S. et al. Microwave absorption properties of in situ grown CNTs/SiC composites //Journal of alloys and compounds. – 2012. – T. 520. – S. 295-300.
32. Grygoruk V. I. et al. Microwave Electrodynamic Characteristics of Ceramic Materials //J. Nano- Electron. Phys. – 2022. – T. 14 – №. 1.

This article delves into the investigation of the structure, physical-mechanical properties, and potential applications of silicon carbide in ceramics. The study explores the infinite stacking of silicon carbide tetrahedra, forming various polytypes such as 15R, hexagonal (4H and 6H), and cubic (3C) structures. Different designations, including Ramsdell's notation, are utilized for the classification and examination of these polytypes. The crystal structure of silicon carbide holds significant importance for high-temperature applications compared to traditional semiconductors. The material exhibits a high modulus of elasticity, hardness, and chemical inertness. The physical-mechanical properties of silicon carbide make it a key material in modern technology. Particularly, its high thermal stability and chemical inertness contribute to its usage at elevated temperatures and in aggressive chemical environments. The wide bandgap of silicon carbide (2.4–3.2 eV) and its ability to absorb ultraviolet and visible light open prospects for applications in optical electronics and biosensing. In the field of ceramics, silicon carbide can serve as an efficient electromagnetic radiation absorber. Its dielectric permeability and thermal stability give the material advantages for creating lightweight and high-temperature absorbers. Studies have shown that silicon carbide composites can provide significant electromagnetic radiation absorption across a broad frequency range, and a high content of alloying elements (N or Al) increases dielectric permeability. These properties make SiC a promising material for applications in high-tech industries, including optical electronics, manufacturing of electromagnetic wave absorbers, and biosensors. Further research in this area has the potential to expand the applications of silicon carbide in crucial technological domains.

Keywords: ceramics, SiC, radioabsorption, nanomaterials, structure, physical-mechanical properties, dielectric properties, polytypes, dielectric permeability

Пітак Я.М. – д.т.н., професор, завідувач кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Майстат М.С. – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»