

Бердянський державний педагогічний університет
Факультет фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти
Кафедра фізики та методики навчання фізики

Пояснювальна записка

до випускної кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня “магістр” на тему:

**ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК В-GA₂O₃, ОТРИМАНИХ РАДІОЧАСТОТНИМ
МАГНЕТРОНОМ НАПИЛЕННЯМ НА ПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ**

Виконав здобувач вищої
освіти 2 курсу групи 2пфн
спеціальність: 105 Прикладна фізика і наноматеріали

Віталій Валерійович КІДАЛОВ

Керівник: канд.фіз-мат. наук,

доцент Ганна КОЛОМОЄЦЬ

Рецензент: д.п.н., доцент Олександр ШКОЛА

Бердянськ - 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ПЕРЕДМОВА	5
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ I. МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРУВАТИХ КРЕМНІЄВИХ ПІДКЛАДОК.....	102
1.1. Комірка для електрохімічного травлення кремнію	102
1.2. Виготовлення поруватих кремнієвих підкладок	113
1.3. Морфологічні особливості поруватих шарів кремнію	124
РОЗДІЛ II. ВИГОТОВЛЕННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ SiC/porous-Si/Si	168
2.1. Установка та методика синтезу плівок SiC	1618
2.2. Морфологічні та структурні особливості гетероструктури SiC/porous- Si/Si .	180
РОЗДІЛ III. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ SiC/porous-Si/Si	213
3.1. Дослідження структурних характеристик гетероструктури SiC/porous- Si/Si	213
3.2. Дослідження оптичних характеристик гетероструктури	257
3.3. Морфологічні та структурні особливості гетероструктури	32
РОЗДІЛ IV. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ZnO/SiC/porous-Si/Si.....	41
4.1 Отримання гетероструктури ZnO / SiC / porous-Si / Si	41
4.2 Дослідження структурних характеристик дослідних зразків гетероструктури ZnO /SiC/porous-Si/Si (100).....	43
ВИСНОВКИ	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕХТ – електрохімічне травлення;

ГС – гетероструктура;

СЕМ – скануючий електронний мікроскоп;

ПК – поруватий кремній;

EDAX– енергодисперсійний аналіз рентгенівських променів;

ФЛ – фотолюмінесценція;

СЕ – сонячний елемент;

ФЕП – фотоелектричний перетворювач;

JCPDS – Об'єднаний комітет з хімічного аналізу з використанням порошкових дифракційних методів при Національному бюро стандартів (Joint Committee on Powder Diffraction Standards);

РСА – рентгеноструктурний аналіз;

ВСТУП

Плівки карбіду кремнію та оксиду цинка останнім часом знаходять застосування як в області фізики напівпровідників, так і в області технології нових напівпровідникових приладів силової, опто- і НВЧ-електроніки.

Однак, незважаючи на значну чисельність робіт з вирощування тонкоплівкових структур на основі SiC та ZnO, розвитку напівпровідникової електроніки перешкоджає низька якість вирощуваних плівок. Структурні дефекти, які виникають у підкладці, а при епітаксійному рості проникають в осаджуваний шар, здатні значно погіршити характеристики приладів. Однак отримання плівок SiC та ZnO, які будуть містити малу кількість дефектів, вимагає налагодження системи управління процесом росту плівки.

Утворення карбіду кремнію та оксиду цинка тієї чи іншої модифікації безпосередньо залежить від параметрів синтезу. Існує досить багато способів вирощування плівок SiC та ZnO. До найбільш поширених слід віднести: методи твердофазного росту, методи хімічних транспортних реакцій (CVD і MOCVD), методи молекулярної променевої епітаксії, катодного та іонного розпилення, електрохімічні методи осадження й ряд інших методів [1].

Потреби електроніки вимагають отримання монокристалічних плівок SiC та ZnO на головному матеріалі електроніки – кремнії. Технологія обробки кремнію добре освоєна світовою електронною промисловістю. Тому проблема вирощування структур SiC/Si та ZnO/Si набирає все більшого значення в сучасній напівпровідниковій промисловості.

Особливо цікавим є гетероперехід 3C-SiC/Si та ZnO/Si у зв'язку з перспективою використання цієї структури для виготовлення діодів та гетеротранзисторів на базі кремнію [2]. На даний час з'являються нові методи виготовлення плівок SiC та ZnO на Si, а також вдосконалюються вже існуючі. Перші спроби отримання плівок SiC на кремнієвих підкладках були виконані С. Нішино [3], який запропонував для вирощування плівок SiC

використовувати метод газотранспортної епітаксії. Однак параметри приладів, як і якість самих плівок, були низькими.

Карбід кремнію володіє великою кількістю структурних політипів. Атоми кремнію і вуглецю перебувають у стані sp^3 -гібридизації й утворюють зв'язок у формі тетраедру. Однак, не дивлячись на те, що у ґратки однаковий ближній порядок, дальній порядок може відрізнятися, що призводить до утворення різноманітних політипів.

Однак при виготовленні даних структур виникає ряд проблем, оскільки підкладка Si, володіючи кубічною симетрією, визначає симетрію осадженої плівки SiC. Тому ще не вдалося отримати високоякісні епітаксійні плівки SiC на основі Si. Кубічний 3C-SiC відрізняється найбільшою рухливістю електронів ($1200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), яка не залежить від кристалографічного напрямку.

Основними вимогами при вирощуванні епітаксійних плівок β -SiC, що не містять гексагональної фази, є виконання умов, що відповідають перенасиченості поверхневих станів атомами кремнію, і вибір діапазону ростових температур.

У роботі [8] наводяться результати експериментів, проведених на плівках SiC, отриманих методом хімічного осадження з газової фази (CVD) на кремнієвих підкладках. Однак рентгенівські вимірювання показали, що дані плівки не були монокристалічними і склалися з розупорядкованих областей розміром менше 10 мкм. В отриманих плівках ФЛ практично не спостерігалася.

Текстуровані гетероепітаксійні плівки 3C-SiC на Si (111) і (100) були отримані за допомогою методу вакуумного лазерного випаровування керамічної мішені в роботі [9]. Температура підкладки в процесі осадження становила 950°C . У роботі ж [10] температуру процесу було знижено до 700°C , при цьому було отримано кристалічні плівки SiC з хорошими оптичними властивостями на підкладках Si (100).

Найбільш простим методом отримання шарів кубічного карбїду кремнію на кремнії є метод хїмічної конверсії в потоці молекул вуглеводню [11]. Однак даний метод вимагає температур вище, ніж при вакуумному лазерному осадженні, а саме обмеженого знизу мінімальною температурою карбїдоутворення (близько $800\text{ }^{\circ}\text{C}$), а зверху – температурою сублимації кремнію з ростовою поверхнею $T_{\text{гр}}^{\text{макс}} = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12].

Авторами роботи [13] для вирощування шарів карбїду кремнію використана установка вакуумної газофазної епітаксії (HVCVD). Шари вирощувалися при температурі близько $900\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ з потоку молекул гексану в діапазоні робочих тисків у реакторі $10^{-5}\text{-}10^{-3}$ Торр. Час росту шару варіював від 1 до 5 годин.

У різних температурних режимах ($700\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{ос}} < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) із використанням елементоорганічних сполук були отримані гетерокомпозиції 3C-SiC/Si шляхом безпосереднього осадження плівки карбїду кремнію на кремній і в результаті фазових перетворень тонких вуглецевмісних плівок твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ всередині шару кремнію при високотемпературному відпалі структури в [14].

Авторами робіт [15, 16] виявлено значний ріст концентрації дефектів і відсутність вираженої дислокаційної структури в шарі кремнію, прилеглому до гетеропереходу 3C-SiC/Si. Отримані плівки були полікристалічними, що значно обмежує приладове застосування даних структур. Встановлено, що напруження проникають тим глибше в підкладку, чим вищою є температура обробки.

У ряді робіт [17, 18, 19] представлені результати з вирощування плівок карбїду кремнію на кремнієвих пластинах новим методом твердофазної епітаксії. Це відкриває нові можливості для послаблення еластичної енергії завдяки залученню точкових дефектів, утворених під час хїмічної реакції в анізотропних середовищах. Даний метод дає можливість отримувати монокристалічні шари кубічного (3C-SiC) та гексагонального політипів (4H-SiC) SiC на підкладках Si великого діаметру.

Суттєва різниця періодів кристалічних ґраток і коефіцієнтів термічного розширення SiC та Si призводить до необхідності створення умов, за яких одночасно з упорядкуванням зародків нової фази на підкладці відбувалася б і релаксація пружної енергії. При цьому в процесі ендотаксії на підкладках кремнію дислокації виконують позитивну роль прихованого геттеру і буферного шару, що рухається перед фронтом росту SiC-фази. Роль буферного шару, що знижує механічні неузгодженості підкладки монокристалічного кремнію і вирощуваного шару карбіду кремнію або оксиду цинка, може успішно грати поруватий кремній.

Класичні гетероструктури і гетероструктури з квантовими ямами і надґратками на основі монокристалічних напівпровідників застосовуються у багатьох напрямках сучасної електроніки, у тому числі і при виробництві приладів сонячної енергетики.

Основна складність при виготовленні гетероструктур полягає у відмінності коефіцієнтів термічного розширення й неузгодженості параметрів ґраток підкладки та вирощеного на її поверхні напівпровідникового покриття. Дані структури зазвичай характеризуються значними механічними напруженнями, які негативним чином позначаються на структурній досконалості і викликають появу високої щільності дислокацій.

Для подолання цих недоліків пропонується перед вирощуванням плівкових покриттів наносити на поверхню підкладки періодичну систему глибоких пор. Регулюючи період і геометричні розміри пор підкладки, можна зменшити механічні напруження у системі. Оптимізація режимів вирощування гетероструктур із заданими електричними та оптичними властивостями потребує отримання досконалих епітаксійних плівок.

Плівка SiC або ZnO на підкладці Si є терморадіаційно стійким матеріалом, який може використовуватися як буферний шар при вирощуванні широкозонних напівпровідників, а також для створення різноманітних пристроїв електроніки. Тому досліджуваний матеріал було

обрано з розрахунку оптимального використання при виготовленні приладів мікро-, оптоелектроніки, нанофотоніки, тощо.

Враховуючи все вищезазначене, актуальним стає питання розробки методів формування, вивчення фізико-технологічних умов виготовлення гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si та дослідження її морфологічних, структурних та оптоелектричних особливостей. Таким чином, робота присвячена розробці нових та вдосконаленню існуючих технологічних методів отримання вище зазначеної гетероструктури.

Метою роботи є розробка методики отримання гетероструктур на основі поруватих напівпровідників Si, а також з'ясування механізмів формування гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si та фізичних процесів, що протікають у ній.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати фізико-технологічні основи отримання гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si та розробити й оптимізувати методику її отримання.

Об'єктом досліджень є гетероструктури SiC/porous-Si/Si та ZnO/SiC/porous-Si/Si.

Предмет дослідження – морфологічні та структурні характеристики гетероструктури SiC/porous-Si/Si та ZnO/SiC/porous-Si/Si.

Методи досліджень: скануюча електронна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, спектральний аналіз, електронографія.

Наукова новизна одержаних результатів: розроблено методику виготовлення плівок ZnO на поруватих кремнієвих підкладках; досліджено механізми росту отриманих плівок та досліджено їх морфологічні, структурні та оптоелектричні особливості.

Результати роботи представлені у публікаціях SCOPUS

- 1 V. Kidalov, A. Dyadenchuk, Yu. Bacherikov, A. Zhuk, T. Gorbaniuk, I. Rogozin, **Vitali Kidalov**, “Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering”, **Turkish Journal of Physics**, vol. 44, pp. 57-66, 2020.

- 2 V. V. Kidalov, A. F. Dyadenchuk, V. P. Kladko, O. I. Gudymenko, M. P. Derhachov, S. O. Popov, O. O. Sushko, **Vitali V. Kidalov**. Structure and electrical properties of β -Ga₂O₃ films obtained by radio frequency magnetron sputtering on porous silicon. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**. 2022. V. 11 (2). P. 025004.
- 3 Valeriy Kidalov, Alena Dyadenchuk, C.Y. Abbasova, V.A. Baturin, O. Yu. Karpenko, O. Y. Gudimenko, **Vitaliy V. Kidalov**. Synthesis and Characterization of SiC-Based Thin Film Heterostructures. **2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)**, 2022.
- 4 V. V. Kidalov, V. P. Kladko, A. F. Dyadenchuk, O. I. Gudymenko, V. A. Baturin, A. Yu. Karpenko, **V. V. Kidalov**. ZnO/SiC/Porous-Si/Si Heterostructure: Obtaining and Properties. **Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii**. 2022, т. 20, № 3, сс. 647–655

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

Виготовлені гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si.

1. можуть бути використані для подальшого вирощування на їх поверхні епітаксійних плівок широкозонних напівпровідників.

2. Досліджені структури можуть бути використані при виробництві фотоперетворювачів, як самостійні елементи або для виготовлення більш складних багат шарових структур.

ВИСНОВКИ

За допомогою методу твердофазної епітаксії виготовлено гетероструктури SiC/porous-Si/Si, що являють собою плівки SiC на мезопоруватій поверхні Si (111) з діаметром пор близько $\sim 10\div 15$ нм і глибиною поруватого шару ~ 220 нм за температури обробки 1290°C .

Структуру плівок SiC досліджено на електроннографі в режимі «на відображення» при швидкій напрузі 75 kV. Електроннограма характеризує структурну досконалість поверхні плівок SiC –точкові рефлекси електроннограм однозначно вказують на епітаксійний шар політипу 3C-SiC. З електроннограми також випливає, що плівки SiC є гладкими та не містять двійників на поверхні.

За результатами, отриманими за допомогою методу високороздільної дифрактометрії (HRXRD), товщина плівки становить ~ 70 нм.

Класична методика рентгенофазового аналізу (XRD) показала присутність як кубічної, так і гексагональної фази в зруйнованій межі між SiC-Siу співвідношенні 80% до 20% відповідно. Отримані результати свідчать про структурну досконалість поверхні плівки 3C-SiC та полікристалічність межі SiC-Si.

У спектрах фотолюмінесценції як при $T=300$ К, так і при $T=77$ К, спостерігається вузька лінія на довжині хвилі ~ 371 нм. Переважаючою є люмінесценція в області гексагональних фаз, які містяться у перехідній області.

За допомогою методу твердофазної епітаксії виготовлено гетероструктури SiC/porous-Si/Si, що являють собою плівки SiC на мезопоруватій поверхні Si (100) з діаметром пор близько ~ 20 нм і глибиною поруватого шару ~ 270 нм за температури обробки 1290°C . За результатами досліджень морфології встановлено, що товщина плівки становить ~ 250 нм, а середньоквадратична шорсткість плівки SiC – 59 нм.

Електронограма характеризує структурну досконалість поверхні плівок SiC – точкові рефлекси електронограм однозначно вказують на епітаксійний шар політипу 3C-SiC. З електронограми також випливає, що плівка SiC є гладкою та не містить двійників на поверхні.

Застосування методики рентгенофазового аналізу показала присутність як кубічної, так і гексагональної фази в плівці SiC. Розмір областей когерентного розсіяння, визначений по формулі Дебая-Шеррера, становить 28.7 нанометрів.

Отримані спектри фотолюмінесценції плівок SiC простягалися від ультрафіолетової області спектру охоплюючи майже всю видиму область спектру. Люмінесценція в області гексагональних фаз політипів 2H та 4H, що містяться в перехідній області, була переважаючою на довжині хвилі ~372 nm.

Досліджено процес формування гетероструктури ZnO/SiC / porous-Si / Si. Плівки ZnO були отримані методом радіочастотного магнетронного розпилення на підкладках Si, попередньо профільованих мезопорами за допомогою електрохімічного травлення, з буферним шаром SiC, отриманим методом заміщення атомів. З використанням комплексу методів скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу та рентгеноструктурного аналізу вивчено морфологію та структуру поверхні плівки ZnO. Дослідження поверхневих властивостей плівки ZnO свідчить про полікристалічну природу покриття з гексагональною решіткою типу вюрцит.

Таким чином, буферний шар SiC дозволяє вирощувати на кремнієвих підкладках шари ZnO, орієнтує їх і захищає підкладку Si від хімічної взаємодії з хімічними елементами в процесі вирощування. Це дозволяє припустити, що даний спосіб вирощування шарів на Si відкриває нові можливості для застосування і нові шляхи синтезу цього матеріалу

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О. А. Агеев и др.; под общей редакцией член-корр. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. Беляева А. Е. и д. т.н., проф. Конаковой Р. В. Харьков: «ИСМА», 2010. 532 с.
2. Зубрилов А. С. Электрические свойства гетеропереходов 3С-SiC/Si. *Физика и техника полупроводников*. 1994. Т. 28, вып. 10. С. 1742 – 1749.
3. Feng Ed. ZheChuan, Jian H. Zhao. Silicon Carbide: Materials Processing and Devices. Vol. 1-2. NY : London, 2004. P. 416.
4. Семенов А. В., Козловский А. А., Пузилов В. М. Фотоэлектрические свойства гетеропереходов n-SiC/n-Si. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. № 5. С. 27 – 30.
5. Schulze N., Barrett D., Pensl G. Controlled Growth of 15R-SiC Single Crystals by the Modified Lely Method. *Physica status solidi*. 2000. Vol. 178, Issue 2. Pp. 645 – 650.
6. Fissel A., Schroter B., Richter W. Low-Temperature Growth of SiC Thin-Films on Si and 6H-SiC by Solid-Source Molecular-Beam Epitaxy. *Appl. Phys. Lett*. 1995. Vol. 66, Issue 23. Pp. 3182 – 3184.
7. Keffous A., Bourenane K., Manseri O. [et al.]. Structural and optical Properties of Polycrystalline 6H-SiC and Crystalline SiC Film grown onto Silicon Substrate by PLD. *Modern Physics Letters B*. 2008. 22:01. Pp. 61 – 72.
8. Данишевский А. М., Шуман В. Б., Гук Е. Г., Рогачев А. Ю. Интенсивная фотолюминесценция пористых слоев пленок SiC, выращенных на кремниевых подложках. *Физика и техника полупроводников*. 1997. Т. 31, № 4. С. 420 – 424.
9. Гусев А. С., Рындя С. М., Зенкевич А. В. и др. Исследование морфологии и структуры тонких пленок 3С-SiC на кремнии методами электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. *Материалы электронной техники*. 2013. № 2. С. 44 – 48.

10. Craciun V., Lambers E., Bassim N. D. [et al.]. Growth of Dense SiC Films on Si at Medium Temperatures by Pulsed Laser Deposition. *J. Vac. Sci. and Technol. A*. 2001. Vol. 19, № 5. Pp. 2691 – 2694.

11. Khan I. H. The Epitaxial Growth Of Beta Silicon Carbide. Proceedings of the International Conference on Silicon Carbide, University Park, Pennsylvania, October 20–23, 1968. – P. 285.

12. Khan I. H., Summergrad R. N. The Growth of Single-Crystal Films of cubic Silicon Carbide on Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 1967. Vol. 11, Issue 1. Pp. 12 – 14.

13. Орлов Л. К., Дроздов Ю. Н., Шевцов В. Б. и др. Морфология гетероэпитаксиальных пленок β -SiC, выращенных на Si (111) методом химической конверсии в вакууме из паров гексана. *Физика твердого тела*. 2007. Т. 49, вып. 4. С. 596 – 601.

14. Орлов Л. К., Дроздов Ю. Н., Дроздов М. Н. и др. Комплексный анализ структуры пленок карбида кремния, выращенных на кремнии в установках вакуумной эпитаксии из гидридов и углеводородов. *Журнал структурной химии*. 2010. Т. 51. С. 148 – 154.

15. Орлов Л. К., Штейнман Э. А., Смыслова Т. Н. и др. Особенности и механизмы роста пленок кубического карбида кремния на кремнии. *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54, вып. 4. С. 666 – 672.

16. Ткачева Т. М., Иванова Л. М., Демаков К. Д., Шахов М. Н. Напряжение и адгезия поликристаллических пленок 3C-SiC, выращенных методом осаждения из газовой фазы на кремниевых подложках. *Материалы электронной техники*. 2012. № 4. С. 24 – 27.

17. Кукушкин С. А., Лукьянов А. В., Осипов А. В., Феоктистов Н. А. Эпитаксиальный карбид кремния на 6-дюймовой пластине кремния. *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, вып. 1. С. 71 – 79.

18. Kukushkin S. A., Osipov A. V. A new method for the synthesis of epitaxial layers of silicon carbide on silicon owing to formation of dilatation dipoles. *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113, Issue 2. Pp. 024909 (7 pp).

19. Kukushkin S. A. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films. *J. Phys. D : Appl. Phys.* 2014. Vol. 47. P. 313001 (41 pp).
20. Латухина Н., Чепурнов В., Писаренко Г. Новые перспективы старых материалов: кремний и карбид кремния. *Электроника : наука, технология, бизнес.* 2013. № 4. С. 104 – 110.
21. Пронин И. И., Гомоюнова М. В., Валдайцев Д. Л., Фараджев Н. С. Формирование SiC при термическом разложении фуллеренов на кремнии. *Физика и химия обработки материалов.* 2001. № 2. С. 48-52.
22. Kidalov, A. Dyadenchuk, Yu. Bacherikov, A. Zhuk, T. Gorbaniuk, I. Rogozin, **Vitali Kidalov**, “Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering”, **Turkish Journal of Physics**, vol. 44, pp. 57-66, 2020.
23. V. V. Kidalov, A. F. Dyadenchuk, V. P. Kladko, O. I. Gudymenko, M. P. Derhachov, S. O. Popov, O. O. Sushko, **Vitali V. Kidalov**. Structure and electrical properties of β -Ga₂O₃ films obtained by radio frequency magnetron sputtering on porous silicon. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**. 2022. V. 11 (2). P. 025004.
24. Valeriy Kidalov, Alena Dyadenchuk, C.Y. Abbasova, V.A. Baturin, O. Yu. Karpenko, O. Y. Gudimenko, **Vitaliy V. Kidalov**. Synthesis and Characterization of SiC-Based Thin Film Heterostructures. **2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)**, 2022.
- 25 V. V. Kidalov, V. P. Kladko, A. F. Dyadenchuk, O. I. Gudymenko, V. A. Baturin, A. Yu. Karpenko, **V. V. Kidalov**. ZnO/SiC/Porous-Si/Si Heterostructure: Obtaining and Properties. **Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii**. 2022, т. 20, № 3, сс. 647–655