

В.В. Кідалов<sup>1,2</sup>, А.Ф. Дяденчук<sup>1</sup>, А.Г. Жук<sup>3</sup>, О.Й. Гудименко<sup>3</sup>, С.В. Сімченко<sup>4</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛІВОК SiC, ОТРИМАНИХ НА ПІДКЛАДИНЦІ porous-Si/Si

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного  
пр. Б. Хмельницького, 18, Мелітополь, 72312, Україна, E-mail: alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua

<sup>2</sup> Технічний університет Дортмунд  
вул. Августа-Смітта, 4, Дортмунд, 44221, Німеччина

<sup>3</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України  
пр. Науки, 41, Київ, 03028, Україна

<sup>4</sup> Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
вул. Солом'янська, 7, Київ, 03110, Україна

У роботі наведено опис методики отримання гетероструктури SiC/porous-Si/Si та дослідження її структурних і морфологічних властивостей. Методика одержання гетероструктур складалася з декількох етапів: електрохімічне травлення монокристалічного кремнію p-Si (111), відпал поруватого Si в атмосфері CO. Виготовлені структури охарактеризовано за допомогою скануючої електронної мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу, рентгенофазового аналізу, високороздільної дифрактометрії, рентгенівської рефлектометрії та фотолюмінесценції.

Метод високороздільної дифрактометрії дозволив оцінити стан SiC/Si(001) системи. На 2Тета-омега дифрактограмах, крім рефлекса (111) Si підкладки в області 2 Тета = 35.67, спостерігається (111) рефлекс кубічної SiC плівки. Це означає, що утворена плівка SiC є текстурованою в напрямі росту (111) кремневої підкладки. Класична методика рентгенофазового аналізу показала присутність гексагональної фази в плівці SiC. Співвідношення концентрації кубічної до гексагональної фази становить 80 % до 20 %. Середньоквадратична деформація ґратки ( $\epsilon$ ) у такій структурі становить  $\epsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ . Спектри фотолюмінесценції плівок SiC дослідних зразків у більшості випадків складаються з вузьких та широких смуг у діапазоні 371–550 нм. В області довжин хвиль, що відповідає енергії забороненої зони гексагонального та кубічного політипів, помітна емісія спостерігалася у більшості зразків. У частини зразків люмінесценція в області гексагональних фаз була переважаючою. У спектрах фотолюмінесценції, як при  $T = 77$  К, так і при  $T = 300$  К, спостерігається вузька лінія на довжині хвилі  $\sim 371$  нм.

**Ключові слова:** плівка SiC, поруватий Si, електрохімічне травлення, метод заміщення атомів

### ВСТУП

На сучасному етапі розвитку електроніки значний інтерес викликають матеріали, які здатні працювати при температурах вище 250 °С. Одним із таких матеріалів є карбід кремнію [1]. Завдяки великим значенням ширини забороненої зони ( $\sim 3.3$  eV), теплопровідності (4.9 Вт/см·К), високій швидкості дрейфу носіїв струму (1000 см<sup>2</sup>/(В·с)), карбід кремнію вважається найперспективнішим для виготовлення силових та високочастотних приладів. Сучасна електроніка вимагає масового виробництва високоякісних тонких плівок SiC на кремнії, які останнім часом привертають до себе значну увагу завдяки низькій вартості пластини та чудовим механічним, хімічним та оптоелектронним властивостям [2]. Крім цього, розвиток технології SiC вимагає

вирощування даних плівок на підкладках великої площі, які сумісні з економічними високовиробничими процесами серійного виробництва, що використовуються в сучасних мікро- та інтегральних схемах. Однак без проведення різнобічних досліджень в цій області неможливо оптимізувати умови отримання гетероструктур SiC/Si із заданими характеристиками і, таким чином, їхнє масове використання в технології елементів електронної техніки.

На даний час з'являються нові методи виготовлення плівок SiC на Si, а також вдосконалюються вже існуючі. Ефективним підходом для виготовлення структури SiC/Si є поєднання процесу реакційного зв'язування (RB) і методу селективного лазерного спікання (SLS) [3]. Авторами роботи [4] запропоновано модифіковану методику

виращування карбіду кремнію із кремнію методом самоузгодженого заміщення атомів, яка дає змогу збільшити досягну товщину утвореного карбіду кремнію. Раніше було повідомлено про виращування однофазних плівок  $\beta$ -SiC методом імпульсної фотонної обробки (PPT) пластин Si (111) з використанням випромінювання ксенонової лампи в атмосфері метану [5]. У роботі [6] досліджували метод контролю кристалічності шару  $n$ -SiC, виращеного на підкладинці  $p$ -Si (111) методом напилення.

Однак, незважаючи на достатнє опрацювання даного питання, актуальним завданням залишається зменшення пружних напруг, які виникають при гетероепітаксії плівок у разі неспівпадіння параметрів кристалічної ґратки підкладки і плівки [7]. Наразі існує декілька варіантів мінімізації цих напруг, серед яких одним з найперспективніших є використання проміжного шару з поруватого кремнію [8–10].

Враховуючи все вищезазначене та зміни в процесах виробництва мікроелектроніки (значна мініатюризація елементів), дослідження мікроструктури плівок має критичне значення. У зв'язку з цим, метою даної роботи є отримання гетероструктури SiC/porous-Si/Si та дослідження її структурних і морфологічних властивостей.

## МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідні зразки монокристалічного кремнію  $p$ -Si діагонально 100 мм, леговані бором із питомим електричним опором 1–10 Ом·см, завтовшки  $500 \pm 25$  мкм, робоча сторона пластин полірована, зворотний бік шліфований, травлений, щільність дислокацій  $< 100$  см<sup>-2</sup>, були попередньо піддані електрохімічному травленню за стандартною методикою [11], яка включала наступні етапи: 1) попередня підготовка кремнієвих пластин – промивання у деіонізованій воді та сушіння у центрифугі; 2) процес травлення підготовлених пластин в електроліті HF:H<sub>2</sub>O:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=2:3:5 – тривалість 10÷30 хв, щільності струмів  $8 \div 400$  мА/см<sup>2</sup>; 3) очищення протравлених пластин від продуктів травлення.

На наступному етапі, згідно методу заміщення атомів [12], отримані зразки поруватого Si (ПК) піддавалися відпалу в атмосфері CO. Для цього зразки ПК поміщуються в реакційну камеру, виготов-

лену із кварцової труби, з тиском  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па, після чого нагрівається графітовим нагрівачем до 950–1400 °С.

Формування плівок SiC на поруватому кремнії орієнтації (111) відбувалося за температури 1290 °С, час росту становив 20 хвилин. Загальний тиск газової суміші (CO + SiH<sub>4</sub>) знаходився в межах 133 Па, при цьому потік газів CO та SiH<sub>4</sub> не перевищували значень 14 та 3.5 см<sup>3</sup>/хв відповідно.

Задля спостереження за морфологією поверхні і поперечних перерізів отриманої структури SiC/porous-Si/Si було використано скануючий електронний мікроскоп Zeiss Supra 25. Хімічний склад поверхні охарактеризовано за допомогою рентгено-спектрального мікроаналізу. Рентгено-структурні дослідження плівок SiC гетероструктури SiC/porous-Si/Si (111) проводились на дифрактометрі Panalytical X'Pert PRO MRD з використанням CuK $\alpha$ 1 випромінювання ( $\lambda = 0.15406$  нм). Для характеристики плівок було використано три основні методики: метод рентгенофазного аналізу (XRD), метод високороздільної дифрактометрії (HRXRD), метод рентгєнівської рефлектометрії (XRR). Люмінесцентні дослідження плівок SiC гетероструктури SiC/porous-Si/Si (111) проведено за допомогою спектрального комплексу КСВУ-12.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Після процесу електрохімічного травлення кремнієві підкладинки були повністю вкриті порами, про що свідчать результати, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа (рис. 1). Параметри одержаної поруватої структури наведено в таблиці 1.

Після відпалу в печі виявилось, що зразки поруватого кремнію вкрито тонкою плівкою товщиною декілька нанометрів. SEM-знімки поверхні зразків (рис. 2) демонструють, незважаючи на щільність шарів, кулеподібну структуру плівки. Висока щільність упаковки призводить до зрощування кристалів, через що поверхня плівки майже гладенька й однорідна.

За результатами СЕМ встановлено параметри отриманої структури (табл. 2).

Виращений шар SiC має лише незначний контакт з Si, що вигідно його відрізняє від

шару SiC, вирощеного при тих самих умовах, але на монокристалічному Si. Це дуже важливий ефект для використання подібних структур як буферного шару для подальшого росту на їхній поверхні епітаксійних плівок широкозонних напівпровідникових сполук. Товщина поруватого шару під плівкою також зазнає змін: із вихідних 224.5 нм збільшується до 1–1.2 мкм, що, імовірно, пов'язано з виникненням дилатаційних диполів [10]. При наявності нанопоруватого шару чадний газ

проникає на глибину даного шару. При цьому в стовпцях нанопоруватого кремнію відбувається заміщення атомів кремнію атомами вуглецю й утворюється молекула SiC та кремнієва вакансія. У результаті нанопоруватий шар перетворюється в плівку карбіду кремнію, а під утвореною плівкою карбіду кремнію утворюються вакансії кремнію, які об'єднуються разом і утворюють пори (рис. 3).

Таблиця 1. Морфологічні особливості поруватих шарів кремнію porous-Si

Найменування показників	Фактичні показники
Товщина поруватого шару, нм	224.5
Діаметр пор, нм	11.4
Відстань між порами, нм	14.5
Ступінь поруватості, %	48 %

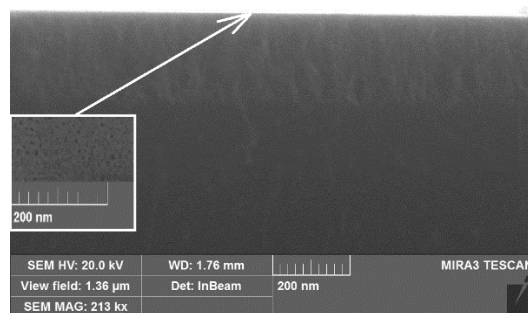


Рис. 1. СЕМ-зображення гетероструктури porous-Si/Si (111)

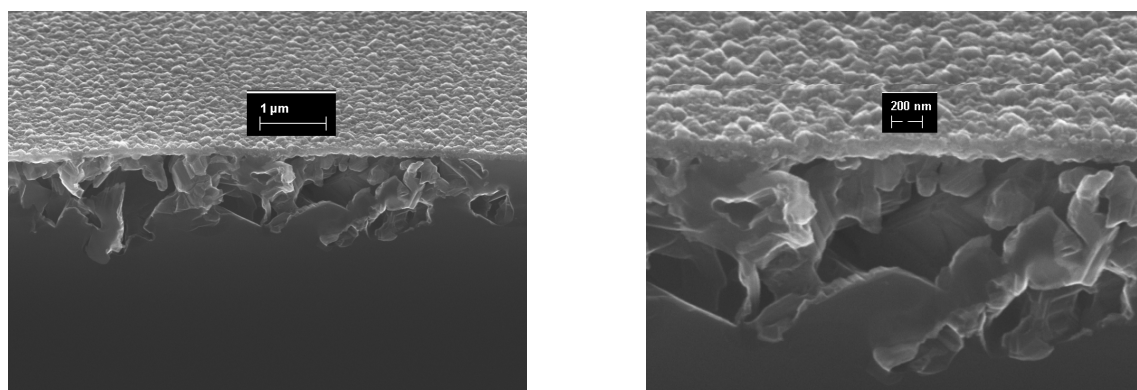


Рис. 2. СЕМ-зображення поверхні та поперечного перерізу досліджуваних зразків гетероструктури SiC/porous-Si/Si (111)

Таблиця 2. Морфологічні особливості гетероструктури SiC/porous-Si/Si

Найменування показників	Фактичні показники	Точність вимірювань/похибка
Товщина плівки SiC, нм	280	±5.0 %
Середньоквадратична шорсткість плівки SiC, нм	48	±1.3 %

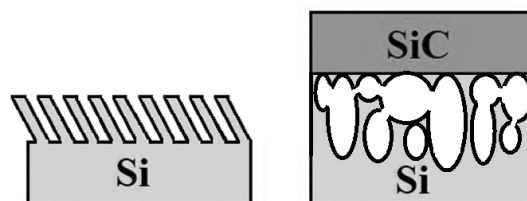


Рис. 3. Модель формування гетероструктури SiC/porous-Si/Si

Одже, задаючи товщину поруватого шару, можна задати товщину плівки карбіду кремнію, а утворені під плівкою карбіду кремнію пори призводять до зменшення механічних напружень в плівці при більших відмінностях між параметрами ґратки плівки та підкладки.

Метод високороздільної дифрактометрії (HRXRD) дозволив оцінити стан SiC/Si(001) системи. На 2Тета-омега дифрактограмах (рис. 4) крім рефлексу (111) Si підкладки в області 2 Тета = 35.67 спостерігається також

(111) рефлекс кубічної SiC плівки. Це означає що утворена плівка SiC є текстурованою в напрямі росту (111) кремнієвої підкладки.

Застосування класичної методики рентгенофазового аналізу (XRD) для полікристалічних матеріалів було проведено методом ковзного пучка. Кут падіння рентгенівських променів на зразок склав 1°. Отримані дифрактограми (рис. 5) оброблялись за допомогою баз ICDD (International Center for Diffraction Data) в програмі High Score.

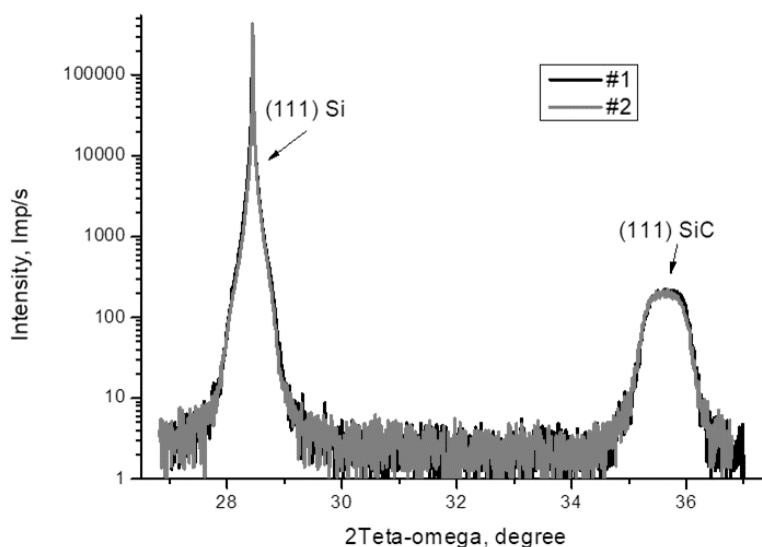


Рис. 4. Високороздільне (HRXRD) 2Тета-омега сканування рефлексу (111) дослідних зразків гетероструктури SiC/porous-Si/Si (111)

Ця методика показала також присутність гексагональної фази в плівці SiC. Співвідношення концентрації кубічної до гексагональної фази становить 80 % до 20 %. Розмитість обумовлена тим, що рентген зачіпає всю структуру, в тому числі і зруйновану межу між SiC-Si, яка є полікристалічною. Дифракційний пік області кута 35.58° відповідає рефлексу (111) від SiC – плівки. Півширина кривої коливання в

площині (111) склала 180 arcsec, в площині (311) – 234 arcsec. Велике розширення цього рефлексу, найімовірніше, викликане мікронапругами через значну невідповідність параметрів Si/SiC, а розмиття дифракційного піку пов'язане з тим, що рентгенівські промені проникають крізь усю структуру, у тому числі й межу між SiC та Si. Середньоквадратична деформація ґратки ( $\epsilon$ ) у такій структурі може бути розрахована за формулою:

$$\varepsilon = \beta/4 \operatorname{tg}\theta, \quad (1)$$

де  $\beta$  – напівширина дифракційної лінії,  $\theta$  – кут дифракції. Оцінка середнього значення коливання значення параметра ґратки перпендикулярно до площини росту, розрахована за формулою (1), становить  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Велика невідповідність ґраток SiC/Si спричиняє утворенню великих мікродеформацій, які призводять як до утворення полікристалічної гексагональної фази SiC, так і до значної кількості дефектів та їхніх скупчень в готовому композиті.

Для дослідних зразків проведено оцінку ступеня структурної досконалості (табл. 3).

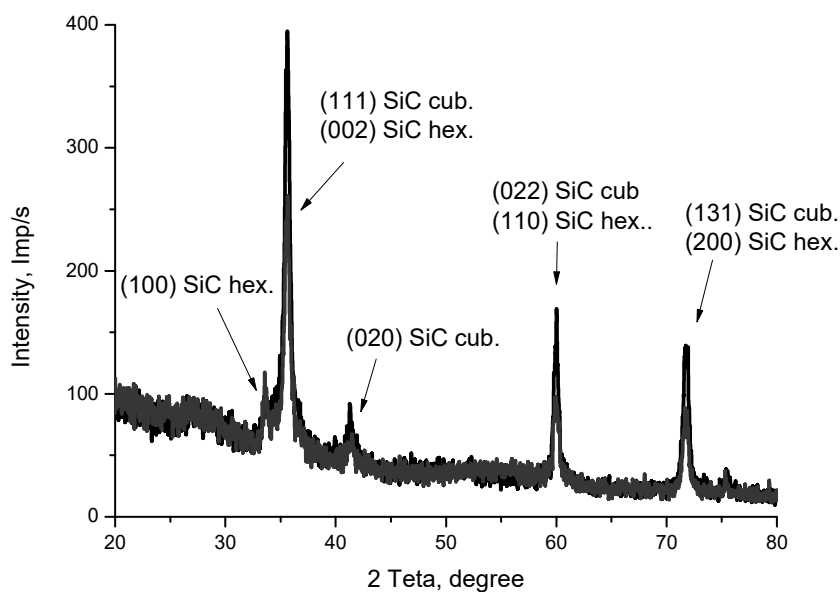


Рис. 5. Дифрактограми рентгенофазового аналізу (XRD)

Таблиця 3. Результати випробувань оцінки ступеня структурної досконалості

Найменування показників	Фактичні показники
Півширина кривої коливання в площині (111)	180 arcsec
Півширина кривої коливання в площині (311)	234 arcsec

Таблиця 4. Макрохарактеристики осадженої плівки SiC

Густина, г/см <sup>3</sup>	Товщина, нм	Напівширина, градус
3.09	67.0	0.70
3.18	70.0	0.68

Метод рентгенівської рефлектометрії дозволив оцінити макрохарактеристики осаджених плівок. Так, з періоду осциляцій на дзеркальних кривих (XRR) визначено товщину SiC плівок, та за положенням критичного кута визначено густину (табл. 4).

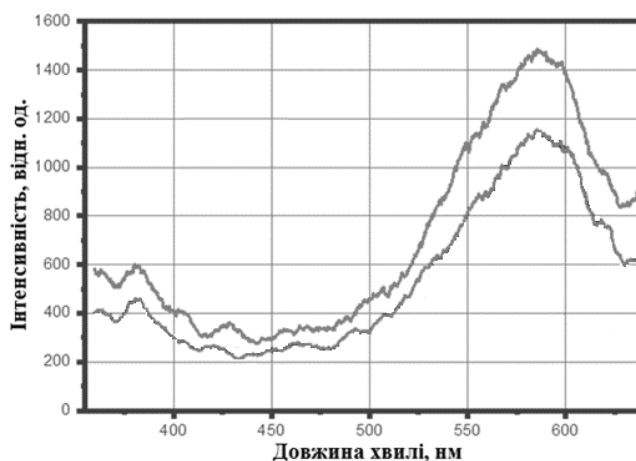
**Дослідження фотолюмінесценції.** При  $T = 300$  К в спектрі ФЛ для обох зразків спостерігаються дві смуги ФЛ (рис. 6): широка інтенсивна смуга з  $\lambda_{\max} \approx 550$  нм і більш вузька

слабка смуга з  $\lambda_{\max} \approx 382$  нм. При зниженні температури до 77 К (рис. 7) максимум смуги зміщується у короткохвильову область ( $\lambda_{\max} \approx 371$  нм), а інтенсивність зростає. Для зразків спостерігається також незначний зсув широкої смуги ФЛ в короткохвильову сторону. Спектр ФЛ при зниженні температури до 77 К зазнає значних змін: інтенсивність смуг з  $\lambda_{\max} \approx 371$  нм і  $\lambda_{\max} \approx 550$  нм істотно спадає, при цьому

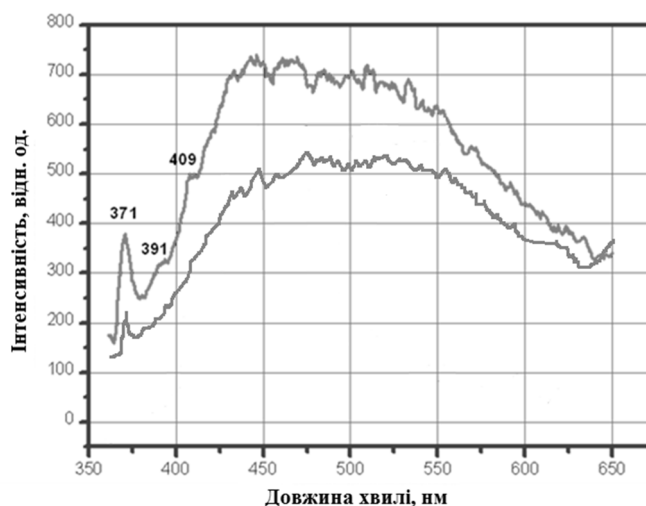
відбувається розгортання смуги ФЛ з  $\lambda_{\max} \approx 437$  нм. Широку смугу ФЛ з максимумом в області 550 нм (рис. 6) зазвичай пов'язують з випромінювальними переходами в центрах домішка-дефект гексагональних політипів SiC [13]. Поява високочастотних смуг ФЛ в області, що відповідає енергії забороненої зони для гексагональних політипів, можна пояснити переходами між локалізованими станами центрів випроміню-

вальної рекомбінації, розташованих в околиці межзеренних меж півки SiC, які можуть утворювати гібридизовані резонансні стани з суцільним енергетичним спектром [14].

Отже, отримані спектри люмінесценції досліджених півок SiC склалися з вузьких та широких смуг у діапазоні 371–550 нм. Люмінесценція в області гексагональних фаз політипів 2H та 4H, що містяться в перехідній області, була переважаючою.



**Рис. 6.** Спектри люмінесценції півок SiC на підкладці ПК при  $T = 300$  К з переважаючою смугою емісії гексагональних політипів 2H та 4H



**Рис. 7.** Спектри люмінесценції півок SiC на підкладці ПК при  $T = 77$  К з переважаючою смугою світіння гексагональних політипів 2H та 4H

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень було охарактеризовано морфологічні особливості гетероструктури SiC/porous-Si/Si, отриманої

шляхом відпалу в атмосфері CO зразків поруватого Si, згідно методу заміщення атомів. Поруваті кремнієві підкладки отримано електрохімічним травленням

монокристалічних пластин Si за стандартною методикою.

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

Класична методика рентгенофазового аналізу (XRD) показала присутність як кубічної, так і гексагональної фази на межі між SiC-Si у 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  $\sim 371$  нм. Переважаючою є люмінесценція в області гексагональних фаз, які містяться у перехідній області.

#### ПОДЯКА

Дослідження підтримано Міністерством освіти і науки України, а саме: НТР № 0121U113502. Розроблення технології виготовлення гетероструктур на основі нанопоруватого кремнію для сонячних фотоелементів, а також Німецьким дослідницьким фондом Walter Benjamin Programme, KI 2865/1-1. і (DFG 529795573).

## Investigation of SiC films obtained on a porous-Si/Si substrate

V.V. Kidalov, A.F. Dyadenchuk, A.G. Zhuk, O.Y. Gudimenko, S.V. Simchenko

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

*18 Bohdan Khmelnytskyi Aven., Melitopol, 72312, Ukraine, alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua*

*Technische Universität Dortmund*

*4 August-Schmidt-Straße, Dortmund, 44227, Germany*

*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine*

*41 Nauki Aven., Kyiv, 03028, Ukraine*

*State University of Information and Communication Technologies*

*7 Solomyanska Str., Kyiv, 03110, Ukraine*

*The paper describes the method of obtaining the SiC/porous-Si/Si heterostructure and the study of its structural and morphological properties. The method of obtaining heterostructures consisted of several stages: electrochemical etching of single-crystal silicon p-Si (111), annealing of porous Si in a CO atmosphere. The fabricated structures were characterized using scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, X-ray phase analysis, high-resolution diffractometry, X-ray reflectometry, and photoluminescence.*

*The method of high-resolution diffractometry made it possible to assess the state of the SiC/Si(001) system. On the 2Theta-omega diffractograms, in addition to the (111) reflection of the Si substrate in the region of  $2\Theta = 35.67$ , the (111) reflection of the cubic SiC film is observed. This means that the formed SiC film is textured in the (111) growth direction of the silicon substrate. The classical technique of X-ray phase analysis showed the presence of a hexagonal phase in the SiC film. The concentration ratio of cubic to hexagonal phase is 80 % cubic and 20 % hexagonal. The RMS deformation of the lattice ( $\epsilon$ ) in such a structure is  $\epsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ . The photoluminescence spectra of the SiC films of the experimental samples in most cases consist of narrow and broad bands and extend from the near ultraviolet to the entire visible spectrum. At the same time, in the range of wavelengths corresponding to the energy forbidden zones of hexagonal polytypes and cubic polytypes, a noticeable glow was observed in most of the samples. In some samples, luminescence in the area of hexagonal phases was predominant. In the photoluminescence spectra both at  $T = 77$  K and at  $T = 300$  K, a narrow line at a wavelength of  $\sim 371$  nm is observed.*

**Keywords:** SiC film, porous Si, electrochemical etching, atom substitution method

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Bacherikov Yu.Yu., Konakova R.V., Kocherov A.N. et al. Effect of microwave annealing on silicon dioxide/silicon carbide structures // Tech. Phys. – 2003. – V. 48, N 5. – P. 598–601.

2. Faisal A.R.M., Nguyen T., Dinh T. et al. 3C-SiC/Si heterostructure: an excellent platform for position-sensitive detectors based on photovoltaic effect // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2019. – V. 11, N 43. – P. 40980–40987.
3. Suocheng Song, Zongqiang Gao, Bingheng Lu et al. Performance optimization of complicated structural SiC/Si composite ceramics prepared by selective laser sintering // *Ceram. Int.* – 2020. – V. 46, N 1. – P. 568–575.
4. Grashchenko A.S., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V. Vacancy growth of monocrystalline SiC from Si by the method of self-consistent substitution of atoms // *Catal. Today*. – 2022. – V. 397–399. – P. 375–378.
5. Kuzmina V.O., Sinelnikov A.A., Soldatenko S.A., Sumets M. Activation energy of subgrain growth process and morphology evolution in  $\beta$ -SiC/Si(111) heterostructures synthesized by pulse photon treatment method in a methane atmosphere // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. – 2018. – V. 29. – P. 20097–20103.
6. Ryosuke Watanabe, Takahiro Tsukamoto, Koichi Kamisako, Yoshiyuki Suda. Crystallinity control of SiC grown on Si by sputtering method // *J. Cryst. Growth*. – 2017. – V. 463. – P. 67–71.
7. Masullo M., Bergamaschini R., Albani M. et al. Growth and Coalescence of 3C-SiC on Si(111) Micro-Pillars by a Phase-Field Approach // *Materials*. – 2019. – V. 12. – P. 3223.
8. Marzegalli A., Cortinovis A., Basso Basset F. et al. Exceptional thermal strain reduction by a tilting pillar architecture: Suspended Ge layers on Si (001) // *Mater. Des.* – 2017. – V. 116. – P. 144–151.
9. Albani M., Marzegalli A., Bergamaschini R. et al. Solving the critical thermal bowing in 3C-SiC/Si(111) by a tilting Si pillar architecture // *J. Appl. Phys.* – 2018. – V. 123. – P. 185703.
10. Kidalov V., Dyadenchuk A., Bacherikov Yu. et al. Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering // *Turk. J. Phys.* – 2020. – V. 44. – P. 57–66.
11. Дяденчук А.Ф., Кідалов В.В. Получение пористого ZnSe методом электрохимического травления // *Ж. нано- и электрон. физ.* – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 03033 (3cc).
12. Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V. et al. Properties of SiC Films Obtained by the Method of Substitution of Atoms on Porous Silicon // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* – 2018. – V. 7, N 4. – P1–P3.
13. Bacherikov Yu.Yu., Konakova R.V., Milenin V.V. et al. Changes in characteristics of gadolinium, titanium, and erbium oxide films on the SiC surface under microwave treatment // *Semiconductors*. – 2008. – V. 42, N 7. – P. 868–872.
14. Orlov L.K., Shteinman E.A., Ivina N.L., Vdovin V.I. Specific features and mechanisms of photoluminescence of nanostructured silicon carbide films grown on silicon in vacuum // *Phys. Solid State*. – 2011. – V. 53. – P. 1798–1805.

#### REFERENCES

1. Bacherikov Yu.Yu., Konakova R.V., Kocherov A.N., Lytvyn P.M., Lytvyn O.S., Okhrimenko O.B., Svetlichnyi A.M. Effect of microwave annealing on silicon dioxide/silicon carbide structures. *Tech. Phys.* 2003. **48**(5): 598.
2. Faisal A.R.M., Nguyen T., Dinh T., Nguyen T.K., Tanner P., Streed E.W., Dao D.V. 3C-SiC/Si Heterostructure: An Excellent Platform for Position-Sensitive Detectors Based on Photovoltaic Effect. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. **11**(43): 40980.
3. Suocheng Song, Zongqiang Gao, Bingheng Lu, Chonggao Bao, Baochao Zheng, Lei Wang. Performance optimization of complicated structural SiC/Si composite ceramics prepared by selective laser sintering. *Ceram. Int.* 2020. **46**(1): 568.
4. Grashchenko A.S., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V. Vacancy growth of monocrystalline SiC from Si by the method of self-consistent substitution of atoms. *Catal. Today*. 2022. **397–399**: 375.
5. Kuzmina V.O., Sinelnikov A.A., Soldatenko S.A., Sumets M. Activation energy of subgrain growth process and morphology evolution in  $\beta$ -SiC/Si(111) heterostructures synthesized by pulse photon treatment method in a methane atmosphere. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2018. **29**: 20097.
6. Ryosuke Watanabe, Takahiro Tsukamoto, Koichi Kamisako, Yoshiyuki Suda. Crystallinity control of SiC grown on Si by sputtering method. *J. Cryst. Growth*. 2017. **463**: 67.
7. Masullo M., Bergamaschini R., Albani M., Kreiliger T., Mauceri M., Crippa D., La Via F., Montalenti F., von Känel H., Miglio L. Growth and Coalescence of 3C-SiC on Si (111) Micro-Pillars by a Phase-Field Approach. *Materials*. 2019. **12**: 3223.
8. Marzegalli A., Cortinovis A., Basso Basset F., Bonera E., Pezzoli F., Scaccabarozzi A., Isa F., Isella G., Zaumseil P., Capellini G., Schroeder Th., Miglio L. Exceptional thermal strain reduction by a tilting pillar architecture: Suspended Ge layers on Si (001). *Mater. Des.* 2017. **116**: 144.
9. Albani M., Marzegalli A., Bergamaschini R., Mauceri M., Crippa D., La Via F., von Känel H., Miglio L. Solving the critical thermal bowing in 3C-SiC/Si(111) by a tilting Si pillar architecture. *J. Appl. Phys.* 2018. **123**: 185703.



10. Kidalov V., Dyadenchuk A., Bacherikov Yu., Zhuk A., Gorbaniuk T., Rogozin I., Kidalov Vitali. Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering. *Turk. J. Phys.* 2020. **44**: 57.
11. Dyadenchuk A.F., Kidalov V.V. Production of porous ZnSe by electrochemical etching method. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2013. **5**(3): 03033. [in Russian].
12. Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V., Grashchenko A.S., Soshnikov I.P., Boiko M.E., Sharkov M.D., Dyadenchuk A.F. Properties of SiC Films Obtained by the Method of Substitution of Atoms on Porous Silicon. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2018. **7**(4): P1–P3.
13. Bacherikov Yu.Yu., Konakova R.V., Milenin V.V., Okhrimenko O.B., Svetlichnyi A.M., Polyakov V.V. Changes in characteristics of gadolinium, titanium, and erbium oxide films on the SiC surface under microwave treatment. *Semiconductors*. 2008. **42**(7): 868.
14. Orlov L.K., Shteinman E.A., Ivina N.L., Vdovin V.I. Specific features and mechanisms of photoluminescence of nanostructured silicon carbide films grown on silicon in vacuum. *Phys. Solid State*. 2011. **53**: 1798.

Надійшла 08.05.2023, прийнята 27.05.2024