

## ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛІННЯ ФОРМУВАННЯМ ПОРУВАТОГО ШАРУ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛАСТИНАХ

С. Е. Притчнн, О. Ю. Бобрішев, О. О. Сорокун, Т. С. Жуматій, С. С. Пилипенко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ORCID: 0000-0002-1400-6177; 0000-0001-7208-2680; 0000-0001-9637-3079; 0000-0002-6851-0838

В роботі запропоновано програмно-апаратний комплекс управління формуванням поруватого шару на напівпровідникових пластинах. Досліджувалися режими травлення монокристалічного кремнію постійним струмом, режим, який традиційно використовується для отримання пористого шару, та імпульсним струмом. У результаті досліджень з використанням спектрів фотолюмінесценції встановлено, що при травленні імпульсним струмом, поруватий шар виходить більш рівномірним. Цей ефект пояснюється тим, що при використанні імпульсного струму в процесі травлення під час нульової фази імпульсу більш інтенсивно руйнується оксидний шар, а кидок струму під час початку одиначної фази імпульсу сприяє видаленню із зони травлення оксидів. Для управління процесом травлення розроблено структурну схему комплексу, запропоновано алгоритм та програмну реалізацію в середовищі програмування LabView. Комплекс контролює технологічні параметри процесу травлення і дозволяє формувати необхідний вид струму травлення. В результаті експериментів встановлено коефіцієнт заповнення імпульсів струму такий що дорівнює 80%, який замечує найбільш рівномірний шар.

**Ключові слова:** поруватий кремній, імпульсний струм, фотолюмінесценція, автоматизований комплекс.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Кремній – широко поширений матеріал, який бере участь у виробництві електронних та інтегральних схем. Кремній володіє поганими оптичними властивостями. Нещодавно було вивчено і досліджено низькорозмірний кремній, такий як поруватий кремній (ПК), з метою поліпшення світловипромінюючих властивостей кремнію [1] у видимій області спектру. Особливу увагу ПК привернув з моменту відкриття його ефективної фотолюмінесценції (ФЛ) у видимій області спектру [2] з метою його застосування у оптоелектронних пристроях. В даний час існує безліч пристроїв, виготовлених із поруватого кремнію, такі як випромінювачі, датчики та медичні пристрої [3]. Якість ПК залежить від морфологічних характеристик пір, тобто від діаметру пори, однорідності її поверхні та товщини шару. Зміни на поруватих поверхнях можуть внаслідок змінити електричні та оптичні характеристики поруватих напівпровідників. Електрохімічне травлення – це простий метод створення пір на поверхні кремнію. Для оптимізації характеристик поруватого шару, технологічними параметрами вирощування, варіюють щільністю струму, часом травлення, формою струму і використовуваним електролітом. Зазвичай електрохімічне анодування проводиться з використанням постійної щільності струму [5]. Однак проблема, з якою зіткнулися при отриманні стабільного струму і стабільного процесу травлення на основі струму, полягала в утворенні бульбашок водню в порах при одночасному зниженні швидкості травлення і призводила до утворення дрібних пір [6]. Це обмежувало можливості формування шарів ПК з високим ступенем відтворюваності.

Вирішення цієї проблеми можливе при використанні травлення не постійним струмом, а імпульсним. У цьому випадку стає можливою комбінація часу подачі струму (Твкл) та часу вимкнення струму (Твимк). Такий спосіб призводить до зменшення пухирців водню, які виділяються в процесі травлення кремнію [7]. Поліпшення поруватості ПК є актуальним завданням, вирішення якого можливе шля-

хом підбору параметрів коефіцієнту заповнення імпульсів струму травлення.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.** Дослідження проводились на напівпровідниковій пластині марки КЕФ n-типу, орієнтацією 100 і значенням питомого опору 0,5 Ом х см. Перед процесом травлення пластина готувалась шляхом занурення в розчин 10 мл. деіонізованої води, 10 мл. перекису водню і 320 мл. сірчаної кислоти. Пластина утримувалась в розчині протягом 60 сек, і потім промивалась в деіонізованій воді.

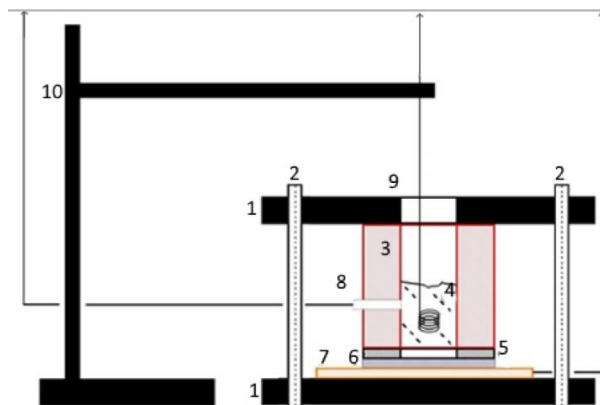


Рисунок 1 – Електрохімічна комірка для анодного травлення пластины кремнію: 1) затискач; 2) шпильки затискачів пластины кремнія; 3) фторопластова комірка; 4) травник HF:H<sub>2</sub>O; 5) ізолююча прокладка; 6) кремнієва пластина; 7) омичний контакт (мідь); 8) датчик температури; 9) платиновий електрод; 10) штатив

Після очищення кремнієві пластини анодували в електрохімічній комірці [8] використовуючи травник HF:H<sub>2</sub>O (1,5:1) при кімнатній температурі, при освітленні лампою розжарення потужністю 100 Вт, розміщеної на висоті близько 20 см над зразками. На рис. 1 схематично показана установка для процесу електрохімічного анодування з метою формування ПК.

У цій роботі використовувалися два електрохімічний процесів: імпульсний струм (ІС) і постійний струм (ПС). Для проведення імпульсного електрохімічного травлення щільність струму становила  $20 \text{ mA/cm}^2$ , коефіцієнт заповнення імпульсів змінювався від 40 до 80% при частоті 7 Гц [9]. Травлення постійним струмом проводилося при щільності струму травлення  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Час травлення в обох експериментах становив 30 хвилин.

Для керування процесом травлення було розроблено програмно-апаратний автоматизований ком-

плекс формування поруватого шару на напівпровідникових пластинах.

Комплекс повинен вирішувати наступні задачі: здійснювати контроль напруги травлення, здійснювати контроль щільності струму травлення, формувати задану форму струму травлення, керувати часом травлення.

Структурна схема комплексу приведена на рис. 1.

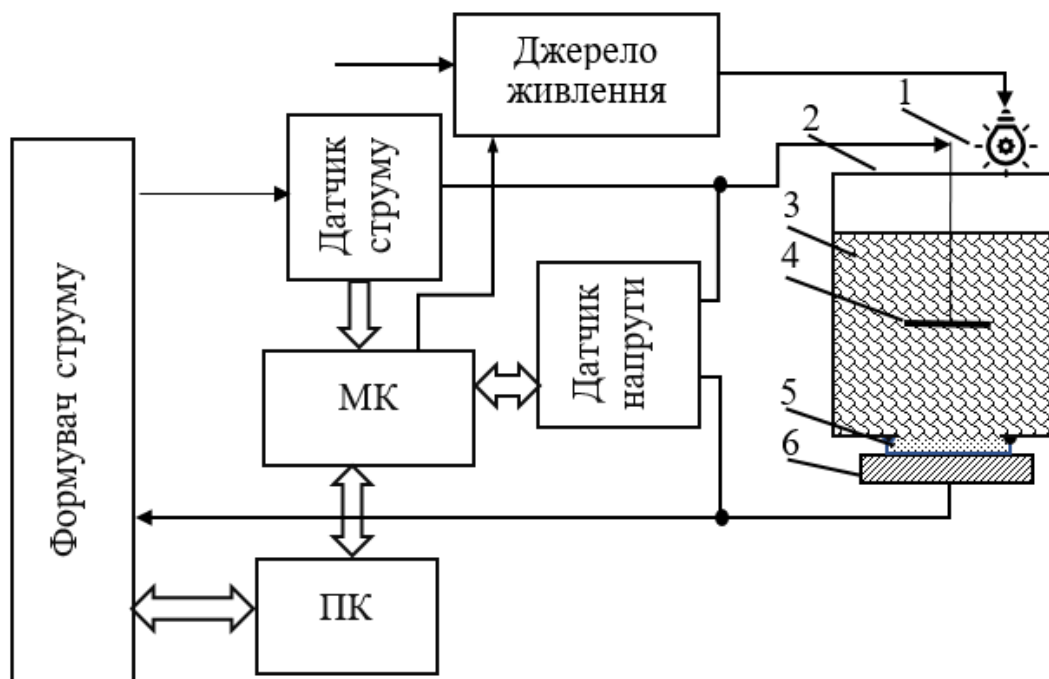


Рисунок 2 – Структурна схема програмно-апаратного автоматизованого комплексу формування поруватого шару на напівпровідникових пластинах: МК – мікроконтролер; ПК – персональний комп'ютер; 1 – джерело світла; 2 – фторопластовий стакан; 3 – електроліт; 4 – платиновий електрод; 5 – зразок (пластина кремнію); 6 – електрод

Формувач імпульсів призначений для подачі струму у вигляді імпульсного або постійного режиму травлення. Одночасно формувач виконує роль стабілізатора струму. В залежності від команд ПК він дозволяє формувати імпульси струму з заданою частотою або коефіцієнтом заповнення.

Струм травлення у вигляді імпульсів або постійного струму через датчик струму формує задану щільність травлення між платиновим електродом і мідним електродом, між якими знаходиться зразок.

Напруга травлення контролюється датчиком напруги, лампа засветки включається через блок питания.

Сбір інформації про перебіг технологічного процесу травлення здійснюється мікроконтролером. Мікроконтролер здійснює обмін інформацією з ПК через інтерфейс USB.

Персональний комп'ютер здійснює контроль і керування технологічним процесом формування поруватого шару. Керуюча програма розроблена в середовищі LabView.

Інтерфейс складається з наступних частин:

1. індикатор часу травлення;
2. графіків знятих з датчиків: напруги  $U$ , струму  $I$ , температури  $T$ ;
3. клавіша старт/стоп для початку та примусової зупинки травлення.

Після під'єднання пристрою до персонального комп'ютера, встановлення напівпровідника в комірку, заливання необхідного розчину та встановлення часу анодування, система починає свою роботу. У додатку на комп'ютері, у реальному часі відображаються дані: Користувач зобов'язаний ввести необхідний час та діапазони анодування. Якщо користувач не заповнює ці поля, програма використовує параметри за замовчуванням. Після введення часу анодування, програма починає свою роботу.

Під час роботи програми, на дисплеї відображаються графіки:

1. графік зміни струму анодування (Зелений колір).
2. графік зміни напруги анодування (Голубий колір).

3. графік зміни температури анодування (Червоний колір).

Користувач має змогу зберегти профіль зміни струму, напруги та температури, коли час анодування закінчився у вигляді звіту.



Рисунок 3 – Інтерфейс користувача

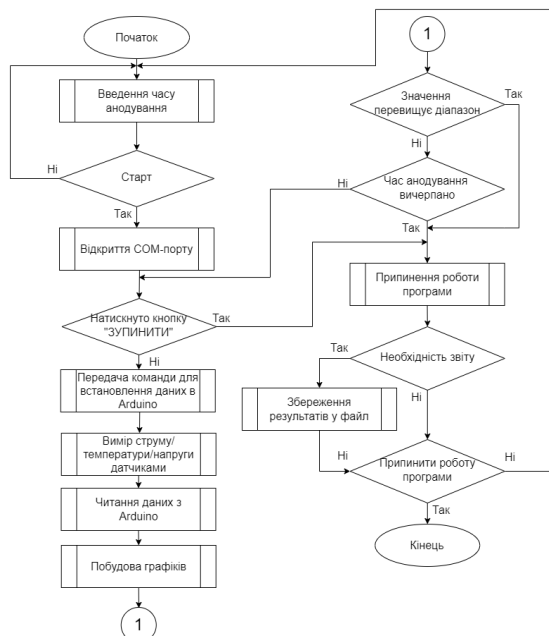
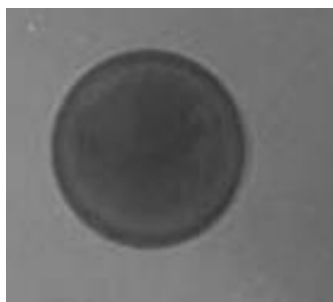
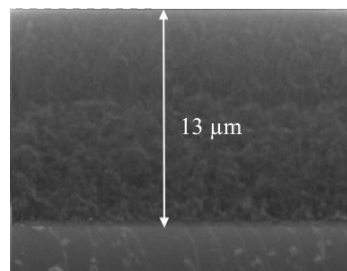


Рисунок 4 – Алгоритм роботи програми

Отримані в результаті травлення імпульсним і постійним струмом зразки з поруватим шаром були досліджені за допомогою мікроскопа, який мав 500-кратне збільшення. Отримані результати представлені на рис. 5 і рис. 6.



а)

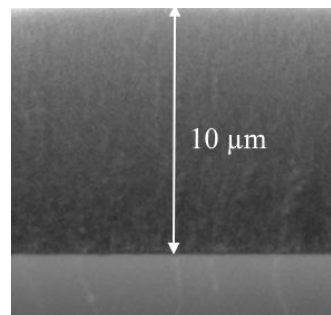


б)

Рисунок 5 – Фотографія зразка з поруватим шаром (а) і зображення поруватого шару (б) на сколі, отримане при 500 кратному збільшенні на оптичному мікроскопі. Анодне травлення постійним струмом щільності 20 мА/см<sup>2</sup>



а)



б)

Рисунок 6 – Фотографія зразка з поруватим шаром (а) і зображення поруватого шару(б) на сколі, отримане при 500 кратному збільшенні на оптичному мікроскопі. Анодне травлення імпульсним струмом щільністю 20 мА/см<sup>2</sup> при коефіцієнті заповнення імпульсів 80%

Можна побачити, що при травленні постійним струмом глибина поруватого шару виходить більше, а сам шар більш пухким, ніж при травленні імпульсним струмом.

Цей ефект можна пояснити тим, що при травленні імпульсним струмом розчинення Si в основному відбувається на невеликих точках протягом короткого терміну часу, з подальшою окислювальною реакцією. При включенні в імпульсному режимі включається напруга травлення, і струм дуже різко зростає, в цей момент підкладка Si розчиняється в електроліті у вигляді оксидів, відбувається активне розчинення. Однак в справжній електролітичній системі, існує дифузійний бар'єр, який перешкоджає процесу розчинення, тим самим забезпечуючи можливість зростання твердотільної плівки.

Це називається активно-пасивним переходом, протягом якого товщина оксидного шару продовжує збільшуватися, поки струм травлення включений. Крім того, оскільки напруга, необхідна для перенесення іонних часток через оксидний шар, збільшується пропорційно товщині оксиду, це призводить до експоненційного зменшення протікання струму в системі. Теоретично, зміни коефіцієнту заповнення імпульсу буде перешкоджати формуванню блокуючого струм травлення оксидного шару. При цій умові реакція травлення протікає протягом часу включення струму, що дає можливість в більший ступені видаляти отримані продукти анодної реакції високої щільності із поверхні шляхом дифузії.

Отримання більш рівномірної поруватості шару можливе за таким коефіцієнтом заповнення, який забезпечує досить повне видалення продуктів окислення. Для вирішення цієї задачі були отримані спектри фотолюмінесценції трьох зразків, виготовлених при коефіцієнті заповнення імпульсу струму травлення 40%, 60% і 80%.

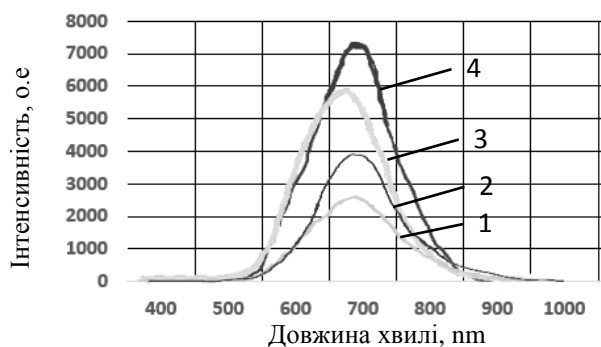


Рисунок 7 – Спектри фотолюмінесценції поруватого шару при різних значеннях коефіцієнту заповнення: 1 – коефіцієнт заповнення імпульсу травлення 40%; 2 – постійний струм; 3 – коефіцієнт заповнення імпульсу травлення 60%; 4 – коефіцієнт заповнення імпульсу травлення 80%

Аналізуючи результати дослідження, можна припустити, що імпульсне анодування створює бімодальний ефект у розподілі розмірів кристалів. Як видно з рис. 7 зразок, виготовлений з використанням постійного струму (2), володіє інтенсивністю фотолюмінесценції більшою, ніж при коефіцієнті заповнення імпульсу травлення 40%, але зі збільшенням коефіцієнта заповнення інтенсивність зростає. Це говорить про те, що поруватий шар, сформований імпульсним струмом з коефіцієнтом заповнення імпульсу понад 60% є одноріднішим. Очевидно, що в процесі електрохімічного травлення утворюються продукти реакції та виділення газу, при цьому концентрація HF знижується на дні дірок n-Si. Це призводить к опору процесу травлення. Подруге процес травлення відбувається у два етапи: утворення шару оксиду та видалення оксиду. Для утворення оксиду потребується протікання струму, тоді як для видалення оксиду струм не потрібен, що і відбувається під час нульової фази імпульсу. Отже, використання імпульсного струму покращить видалення оксиду. Видалення оксиду означає витончен-

ня бар'єрного шару, що дозволяє збільшити струм на початку наступного включення. Це, у свою чергу, сприятиме витравленню більш товстого оксидного шару під час дії нульової фази. Для хорошого формування поруватих шарів необхідно знайти відповідне відсоткове співвідношення між нульовою і позитивною фазою для визначення коефіцієнту заповнення.

Аналіз фотолюмінесценції показує що до коефіцієнту заповнення імпульсу 40% отримується найтонший і неоднорідний поруватий шар. Це відбувається, тому що не вистачає часу для розчинення продуктів реакції ( оксидний шар) і, в результаті, отримати твердотільну плівку оксиду, що призводить до зменшення анодного струму і процесу травлення. Для зразків отриманих при коефіцієнті заповнення понад 60% утворюється однорідніший і товстіший шар. Це пов'язано з тим, що для розчинення продуктів реакції виділяється достатнє співвідношення між нульовою і позитивною фазою, що покращую процес травлення.

ВИСНОВКИ. У роботі показано вплив форми струму кремнію на формування поруватого шару. При використанні імпульсного струму, структура поруватого шару стає більш рівномірною, про що свідчить збільшення інтенсивності спектру фотолюмінесценції на довжині хвилі 650 нм.

Для управління процесом травлення был разработан програмно-апаратний автоматизований комплекс управління формуванням поруватого шару на напівпровідникових пластинах.

Удосконалено метод травлення монокристалічного кремнію з метою отримання поруватого шару з рівномірною структурою за рахунок використання струму травлення в вигляді імпульсів з коефіцієнтом заповнення 80% і частотою 7 Гц.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Amran T. S. T., Hashim M. R., Ali N. K., Yazid H., Adnan R. The role of pulse time Toff on porous silicon as template for Au nanoparticles by using the integrated electrochemical technique. *Physica B : Condensed Matter*. 2012. V. 407. P. 4540–4544.
2. Naderi N., Hashim M. R., Amran T. S. T. Enhanced physical properties of porous silicon for improved hydrogen gas sensing. *Superlattices and Microstructures*. 2012. V. 51. P. 626–634.
3. Imai K. Porous silicon formation mechanisms. *J. Appl. Phys.* 1992. V. 31. P. R1–R22.
4. Oksanich A. P., Pritchich S.E., Kogdas M. G., Dernova M. G. Effect of Porous GaAs Layer Morphology on Pd/porous GaAs Schottky Contact. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*. 2019. V. 11. No 5. P. 05007–05010.
5. Oksanich A. P., Pritchich S. E., Mashchenko M. A., Bobryshev A. Yu. Effect Of The Porous Silicon Layer Structure On Gas Adsorption. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*. V. 12. P. 04020–04025.
6. Lehmann V, Foll H. Formation mechanism and properties of electrochemically etched trenches in n-type silicon. *J. Electrochem. Soc.* 2019. V. 137. P. 653–659.

7. Hummel E. R., Chang S. Novel technique for preparing porous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 61. P. 1965–1967.

8. Оксанич А. П., Притчин С. Е., Когдась М. Г., Холод О. Г., Машченко М. А. Удосконалення методу отримання поруватого шару на підкладках n-GaAs. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. № 6. С. 228–234.

9. Ali N. K., Hashim M. R., Abdul Aziz A., Abu Hassan H., Ismail J. Formation of Porous GaAs by Pulsed Current Electrochemical Anodization : SEM, XRD, Raman, and Photoluminescence Studies. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2009. V.12. P. K9-K13.

## SOFTWARE AND HARDWARE AUTOMATED CONTROL COMPLEX FOR THE FORMATION OF A CRACKED LAYER ON SEMICONDUCTOR PLATES

S. Pritchyn, O. Bobrishev, O. Sorokun, T. Zhumatii, S. Pilipenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ORCID: 0000-0002-9931-1591; 0000-0002-3788-9320; 0000-0002-5866-290X; 0000-0001-7088-1315; 0000-0002-6851-0838

**Purpose.** Porous silicon is widely used in devices such as light emitters, sensors, and medical devices. The quality of operation of these devices depends on the diameter of the pore, the uniformity of its surface, and the thickness of the layer. To control the characteristics of the porous layer, the current density, etching time, and current shape are changed. As a rule, the growth is carried out using a constant current density. In this case, hydrogen bubbles are formed in the pores with a simultaneous decrease in the etching rate, which leads to the formation of small pores. This limits the possibility of obtaining porous silicon with a high degree of reproducibility. **Methodology** The research was carried out on a semiconductor wafer. After cleaning, the silicon wafers were etched in an electrochemical cell at room temperature. For the study, two types of etching current were used: current in the form of rectangular pulses with a variable duty cycle and direct current. For the pulsed current, the density was  $20 \text{ mA/cm}^2$ , the duty cycle of the pulses varied from 40 to 80% at a frequency of 7 Hz. For direct current, the etching current density was  $20 \text{ mA/cm}^2$ . The etching time in both experiments was 30 minutes. **Findings.** The paper shows the influence of the shape of the silicon etching current on the formation of a porous layer. To control the etching process, a hardware-software automated complex for controlling the formation of a porous layer on semiconductor wafers was developed. **Originality.** When using a pulsed current, the structure of the porous layer becomes more uniform, as evidenced by an increase in the intensity of the photoluminescence spectrum at a wavelength of 650 nm. **Practical value.** The results of the work can be used in the development of such devices as light emitters, sensors and medical devices. **Conclusions** The method of etching single-crystal silicon has been improved in order to obtain a porous layer having a uniform structure by using the etching current in the form of pulses with a duty cycle of 80% and a frequency of 7 Hz.

**Keywords:** porous silicon, pulse current, photoluminescence, automated complex.

### REFERENCES

1. Amran, T. S. T., Hashim, M. R., Ali, N. K., Yazid, H., Adnan, R. (2012). The role of pulse time Toff on porous silicon as template for Au nanoparticles by using the integrated electrochemical technique. *Physica B : Condensed Matter*. V. 407. pp. 4540–4544.

2. Naderi, N., Hashim, M. R., Amran, T. S. T. (2012). Enhanced physical properties of porous silicon for improved hydrogen gas sensing. *Superlattices and Microstructures*. V. 51. pp. 626–634.

3. Imai, K. (1992). Porous silicon formation mechanisms. *J. Appl. Phys.* V. 31. pp. R1–R22.

4. Oksanich, A. P., Pritchyn, S.E., Kogdas, M. G., Dernova, M. G. (2019). Effect of Porous GaAs Layer Morphology on Pd/porous GaAs Schottky Contact. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*. V. 11. No 5. pp. 05007–05010.

5. Oksanich, A. P., Pritchyn, S. E., Mashchenko, M. A., Bobryshev, A. Yu. Effect Of The Porous Silicon Layer Structure On Gas Adsorption. *Journal Of Nano- And Electronic Physics*. V. 12. pp. 04020–04025.

6. Lehmann, V, Foll, H. (2019). Formation mechanism and properties of electrochemically etched trenches in n-type silicon. *J. Electrochem. Soc.* V. 137. pp. 653–659.

7. Hummel, E. R., Chang, S. (2002). Novel technique for preparing porous silicon. *Appl. Phys. Lett.* V. 61. pp. 1965–1967.

8. Oksanich, A. P., Pritchyn, S.E., Kogdas, M. G., Kholod, O. G., Mashchenko, M. A. (2018). Udoskonalennia metodu otrymannia poruvatoho sharu na pidkladkakh n-GaAs [Improvement of the method of obtaining a porous layer on n-GaAs substrates]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho*. № 6. pp. 228–234.

9. Ali, N. K., Hashim, M. R., Abdul Aziz, A., Abu Hassan, H., Ismail, J. (2009). Formation of Porous GaAs by Pulsed Current Electrochemical Anodization : SEM, XRD, Raman, and Photoluminescence Studies. *Electrochemical and Solid-State Letters*. V.12. pp. K9-K13.

Стаття надійшла 23.11.2021