

О. М. ФРОЛОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та електрообладнання
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-2186-9488

С. Р. СЕЛІВЕРСТОВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання
і засобів автоматизації
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0003-1015-1593

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАРИКАПІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ САМО-СУМІЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ШАРІВ

Вимоги до параметрів роботи сучасного електронного обладнання диктують пошук змін у підходах та методах, технології отримання електронних компонентів. Одним з розповсюджених елементів електронних схем є ємнісні діоди – варикапи. Різноманітність їх застосування обумовлена можливістю одночасного використання декількох робочих параметрів варикапів. Тому, пошук альтернативних методів та технологій виготовлення варикапів залишається актуальною задачею.

В роботі запропонований новий підхід до технологічного процесу виготовлення напівпровідникової структури варикапів. Він базується на основі отримання технологічних шарів пористого анодного оксиду кремнію та використання методів само-суміщення шарової структури напівпровідника. Наслідками нововведень такого технологічного процесу є скорочення кількості операцій фотолітографії до однієї. Такий підхід не тільки скорочує час технологічного процесу, але дозволяє виключити багатократні супроводжувальні процеси підготовки поверхні пластини, їх хімічне очищення, травлення, дифузії домішок, суміщення шаблонів фотолітографії та інші. За рахунок скорочення кількості операцій знижується ризик спотворень робочих параметрів виготовлених варикапів у ході процесів отримання структур та виготовлення електронних компонентів. Все це приводить до зменшення фінансово-економічних складових отримання якісних електронних приладів з фіксованими параметрами. А також, зменшення небезпечних для довкілля хімічних операцій.

Ще однією важливою задачею є наближення теоретично розрахованих параметрів варикапів з отриманими промисловими зразками. Існують різні технології, що забезпечують фіксацію одного або двох основних параметрів варикапу. Однак, єдиної загальної технології, яка б забезпечувала одночасну повторюваність декількох параметрів та характеристик, не існує. В даній роботі відображені результати застосування такої технології виготовлення варикапів і надана порівняльна характеристика основних параметрів приладів з тими, що отримані із застосуванням інших технологій.

Ключові слова: варикап, технологія, пористий анодний оксид кремнію.

A. N. FROLOV

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department
of Automation and Electrical Equipment
National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov
ORCID: 0000-0003-2186-9488

S. R. SELIVERSTOVA

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Operation
of Ship Electrical Equipment and Automation Systems
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0003-1015-1593

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING VARICAPS USING METHODS OF SELF-COMBINATION OF TECHNOLOGICAL LAYERS

The requirements to the performance parameters of modern electronic equipment dictate the search for changes in approaches and methods, and the technology of electronic components. One of the most common elements of electronic circuits is capacitive diodes – varicaps. The diversity of their application is due to the possibility of simultaneous

use of several operating parameters of varicaps. Therefore, the search for alternative methods and technologies for manufacturing varicaps remains an urgent task.

In this work, a new approach to the technological process of manufacturing the semiconductor structure of varicaps is proposed. It is based on the production of technological layers of porous anodic silicon oxide and the use of methods of self-alignment of the semiconductor layer structure. The consequences of the innovations of this technological process are a reduction in the number of photolithography operations to one. This approach not only reduces the process time, but also eliminates multiple accompanying processes of wafer surface preparation, chemical cleaning, etching, impurity diffusion, photolithography template alignment, etc. Reducing the number of operations reduces the risk of distortion of the operating parameters of the manufactured varicaps during the processes of obtaining structures and manufacturing electronic components. All this leads to a reduction in the financial and economic components of obtaining high-quality electronic devices with fixed parameters. It also reduces chemical operations that are hazardous to the environment.

Another important task is to approximate the theoretically calculated parameters of the varicaps with the obtained industrial samples. There are various technologies that provide fixation of one or two main varicap parameters. However, there is no single common technology that would ensure the simultaneous repeatability of several parameters and characteristics. This paper presents the results of applying such a varicap manufacturing technology and provides a comparative characterization of the main parameters of the devices with those obtained using other technologies.

Key words: varicap, technology, porous anodic silicon oxide.

Постановка проблеми

Лінійка компонентів діодної групи, дійсно, необмежена. Робота будь-якої електронної апаратури неможлива без діодної бази. Разом з тим, можливість суміщення параметрів роботи різних компонентів при збереженні їх функціоналу, залишається актуальною [1, 2].

Одним з таких компонентів діодної групи є варикап. Це електронний компонент, характеристикою якого є нормована величина ємності при відповідних напругах зворотного зміщення [3, 4]. Завдяки чому, варикапи широко використовують як альтернативу конденсаторам зі змінною ємністю. В системах автоматичного регулювання варикапи застосовують для налаштування на необхідну частоту.

Область використання варикапів, в першу чергу, визначається за його основними параметрами та характеристиками, такими як напруга пробою, добротність, коефіцієнт перекриття по ємності, величина ємності при заданій напрузі та рівень зворотних струмів [3, 4].

Особливості технологічних процесів та операцій напряму впливають на робочі параметри варикапів. Структурна досконалість матеріалу підкладок та епітаксійних шарів, процесів легування домішками, проведення фотолітографії, процеси окислення та очищення поверхонь та інші чинники, які визначають якість отриманих компонентів і складають сутність обраної технології виготовлення варикапів, мають бути економічно обґрунтованими [5, 6]. Для цього потрібно забезпечити максимальний відсоток повторюваності параметрів варикапу при їх виготовленні. Це можливо отримати при розробці такої технології виготовлення варикапів, яка має відповідну розрахункову модель, результати якої підтверджені отриманими експериментальними даними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз конструкцій та технологій виготовлення варикапів [6, 7, 8], показує, що для отримання варикапу з параметрами та характеристиками, близькими до теоретично можливих при зниженій собівартості виготовлення технологічний процес створення приладу повинен включати наступне [9]:

- для отримання високого значення напруги пробою структура варикапа повинна мати меза-структуру, або подібну;
- для отримання максимально можливої величини добротності структура варикапа не повинна мати додаткового опору в будь-якій області;
- найбільшу величину коефіцієнта перекриття по ємності можна отримати в структурі з ОЗГ (областю зворотного градієнту), де розподіл ОПЗ (області просторового заряду) р-п переходу в бічні сторони обмежений або взагалі відсутній;
- для отримання малих значень зворотних струмів р-п переходу на місці виходу на поверхню повинні бути захищені шаром термічного оксиду кремнію, а металом контакту повинен бути метал, якій не дає глибоких рівнів в забороненій зоні напівпровідника;
- для отримання малих відхилень параметрів та характеристик (тобто для їх високої повторюваності) необхідно щоб площа р-п переходу визначалася тільки розміром вікна при фотолітографії;
- для отримання низької собівартості кількість операцій фотолітографії повинна бути не більш однієї.

Тобто, структура варикапа повинна бути подібною до меза-структури, в якій ОПЗ р-п переходу не розповсюджується в бічні сторони, але при цьому структура не повинна мати додаткових опорів. Технологія виготовлення такої структури повинна передбачати захист р-п переходів в місці їх виходу на поверхню термічним оксидом кремнію, а металом контакту повинен бути алюміній, якій не має глибоких рівнів в забороненій зоні напівпровідника [8].

Остання вимога до технологічного процесу – це низька собівартість виготовлення. На цей показник впливає кількість процесів фотолітографії. Перша фотолітографія має найменшу собівартість, тому що не потребує втрат часу на індивідуальне суміщення фотошаблонів з попередніми шарами на кожній пластині.

Однак структура сучасного варикапу має декілька технологічних шарів: епітаксійний шар n-типу на n+ підкладці, шар зворотного градієнту n-типу, шар області p-типу, шар металевого контакту до області p-типу.

Тому, для отримання найменшої собівартості для зменшення кількості фотолітографій необхідно використовувати методи само-суміщення, коли при допомозі однієї фотолітографії формуються більш одного технологічного шару. Метод само-суміщення технологічних шарів використовується в технології виготовлення МОН транзисторів з затворами з полікристалічного кремнію [3, 10], коли при фотолітографії формуються розміри затворів з полікристалічного кремнію, а по їх границям формуються границі областей стоків та витоків. Методи само-суміщення в наш час використовуються й для виготовлення сучасних мікросхем на біполярних транзисторах.

Одною з технологій виготовлення структур діодів з використанням метода само-суміщення є технологія з застосуванням пористого анодного оксиду кремнію, яка запропонована для виготовлення діодів Шотткі [10].

Однак, технології виготовлення варикапів, яка б мала сукупність всіх параметрів та характеристик, близьких до теоретично можливих, на даний час відсутня.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка технологічного процесу, в якому буде досягнуто оптимальне співвідношення параметрів та характеристик варикапів при зниженні економічних показників собівартості їх виготовлення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Матеріал наведених досліджень даної роботи, є продовженням пошуку технології виготовлення варикапів з оптимальним співвідношенням параметрів, що розглядалася в роботах [8, 9].

В запропонованому варіанті технології виготовлення варикапів приведені тільки основні технологічні операції. Для виготовлення кристалів варикапів використовують одношарові епітаксійні структури, на яких проводять наступні основні технологічні операції:

1. Хімічна обробка пластин;
2. Контроль обробки;
3. Іонне легування*фосфором;
4. Хімічна обробка після іонного легування;
5. Дифузія фосфору*(формування області зворотного градієнту);
6. Контроль дифузійного шару*;
7. Хімічна обробка пластин;
8. Контроль обробки;
9. Дифузія бора;
10. Видалення боро-силікатного скла;
11. Контроль дифузійного шару;
12. Хімічна обробка пластин;
13. Контроль обробки;
14. Нанесення шару нітриду кремнію Si_3N_4 ;
15. Контроль параметрів шару нітриду кремнію;
16. 1-а фотолітографія по нітриду кремнію;
17. Контроль після фотолітографії;
18. Анодне окислювання (пористий оксид);
19. Контроль шару пористого оксиду;
20. Хімічна обробка пластин;
21. Контроль після обробки;
22. Термічне окислювання (захист p-n переходів);
23. Контроль шару термічного окислу;
24. Селективне видалення шару нітриду кремнію в ортофосфорної кислоті;
25. Контроль зовнішнього виду після видалення шару нітриду кремнію;
26. Контроль вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик;
27. Додаткова дифузія бору (при необхідності з попередньою хімічною обробкою);
28. Хімічна обробка перед нанесенням алюмінію;
29. Нанесення шару алюмінію в вакуумних установках;
30. Контроль шару алюмінію;
31. Контроль зовнішнього вигляду кристалів;
32. Відпал алюмінію;
33. Контроль параметрів кристалів на пластині;

* – для варикапів з областю зворотного градієнту.

Такий технологічний процес дозволяє отримати структуру варикапу з областю зворотного градієнту, яка показана на рисунку 1.

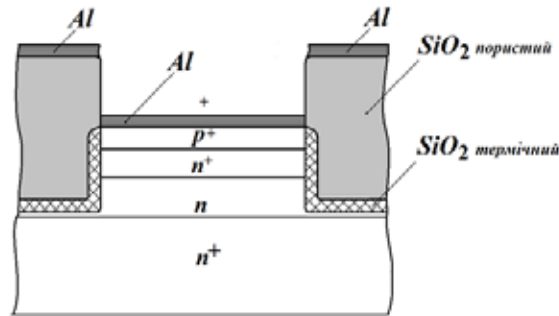


Рис. 1. Поперечний переріз структури надрізного варикапу з шаром пористого анодного оксиду кремнію

Пористий анодний оксид росте в напрямку вертикально донизу та нагору строго по межі маскувального шару, та не розповсюджуються в боки. Це дозволяє застосувати метод само-суміщення основних технологічних шарів в структурі варикапа. Більш наочно технологічний процес, запропонований для виготовлення структури надрізного варикапу при використанні в технологічному процесі пористого анодного оксиду кремнію, приведений на схемі рисунок 2.

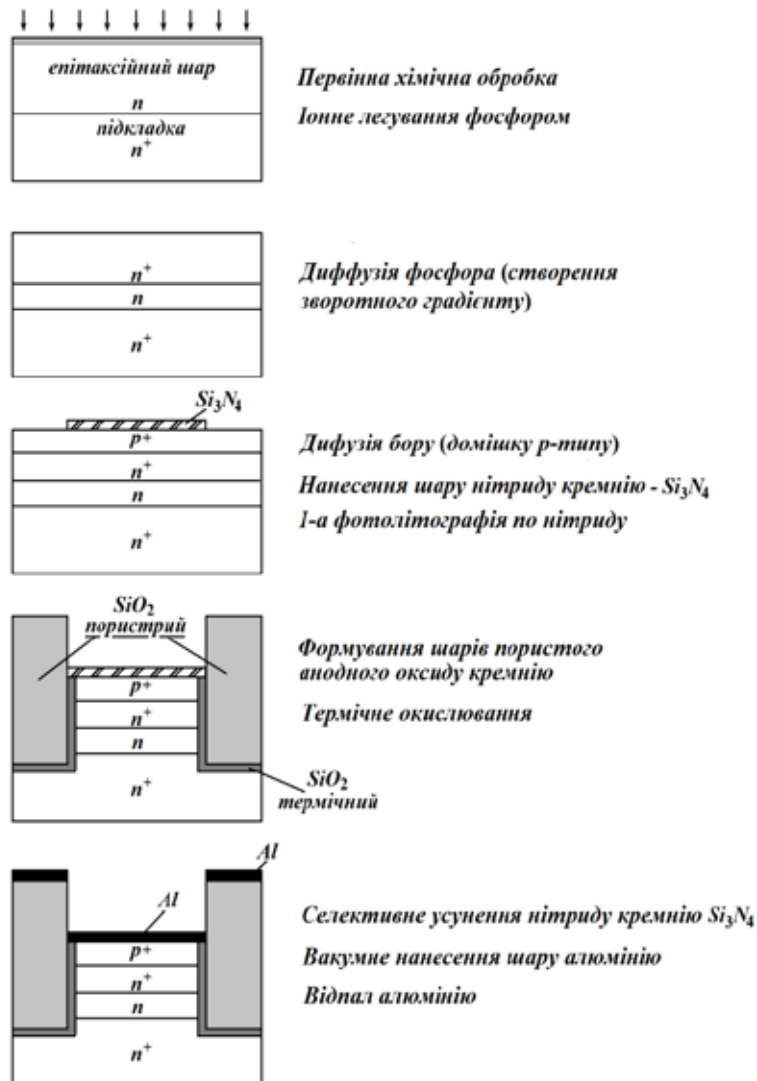


Рис. 2. Схема технологічного процесу виготовлення надрізного варикапу при використанні пористого анодного оксиду кремнію

За рахунок застосування метода само-суміщення при проведенні тільки одної фотолітографії формуються: шар пористого анодного оксиду кремнію, область зворотного градієнту, область анода з р-n переходом, шар металевого (алюмінієвого) контакту до анода. Розміри області зворотного градієнту та області анода формуються за рахунок росту шару пористого анодного оксиду кремнію. Шар алюмінію, товщиною порядку 1 мкм наноситься на пластину в вакуумних установках. При висоті шару пористого анодного оксиду над поверхнею більш 10-11 мкм, шар алюмінію має розрив на вертикальних стінках пористого анодного оксиду кремнію. Тобто, цей шар також створюється за методом само-суміщення.

При необхідності мати меншу висоту пористого анодного оксиду кремнію, додаються технологічні операції заповнення проміжків між стінками пористого оксиду тонким шаром фоторезисту на центрифугах, видалення алюмінію в кислотних розчинах та видалення фоторезисту.

Таким чином, використання технології з пористим анодним оксидом кремнію дозволяє застосувати методи само-суміщення, а це приводить до зменшення собівартості виготовлення приладів, тому що в технологічному процесі використовується тільки одна фотолітографія, яка не потребує суміщення з попередніми технологічними шарами.

Для розуміння можливості застосування технологічного процесу виготовлення варикапів, що пропонується, слід розглянути, як виконуються вимоги щодо отримання параметрів та характеристик приладів, близьких до теоретично можливих.

Структура варикапа, показана на рисунку 1, подібна до типової меза-структури діодів, тому не має кривизни фронту р-n переходу. Це дозволяє отримати напругу пробою, максимально можливою для плоских ступеневих (різких) р-n переходів.

Також, в цій структурі немає будь-яких шарів, які б приводили до появи додаткового опору, що дозволяє отримувати величину добротності близьку до теоретично можливої.

Площа р-n переходу при підвищенні напруги зворотного зміщення не збільшується за рахунок розповсюдження в боки тому, що вона обмежується стінками пористого анодного оксиду кремнію разом з тонким шаром якісного термічного оксиду кремнію. А це дозволяє отримати максимально-можливу величину коефіцієнта перекриття по ємності.

Величина зворотного струму напівпровідникових приладів має декілька складових. Для зменшення рівня зворотного струму по поверхні застосують термічний оксид кремнію. В даній технології цей оксид формується за рахунок того, що атоми кисню при процесі термічного окислення проникають через пори пористого анодного оксиду до кремнію, де й створюється тонкий шар термічного оксиду кремнію. Таким чином, ця складова зворотного струму буде мінімально-можливою. Друга складова зворотного струму пов'язана з наявністю глибоких рівнів в забороненій зоні напівпровідника. Такі рівні дають деякі метали, наприклад нікель, що приводить до збільшення величини зворотного струму на 3-4 порядки. В запропонованій технології в якості металу застосовано алюміній, який не дає глибоких рівнів в забороненій зоні, тому ця складова також буде мінімально-можливою.

Додатковим, але важливим, показником є повторюваність параметрів та характеристик приладів на різних пластинах, та на різних партіях пластин. Одним з основних показників є повторюваність ємності при заданій напрузі. В структурі варикапу цей показник пов'язаний з розміром площі р-n переходу разом з його ОПЗ. В запропонованій технології розмір площі р-n переходу визначається тільки розміром вікна на фотошаблоні при першій фотолітографії. Типове відхилення розмірів вікон на фотошаблоні не перевищує десятих часток мкм, або ще менше. Тому, при використанні даної технології повторюваність параметрів та характеристик приладів буде дуже високою.

Найменша собівартість виготовлення визначається використанням тільки однієї (першої) фотолітографії, яка не потребує суміщення з попередніми технологічними шарами, застосуванням методів само-суміщення, та відсутністю додаткових складних технологічних операцій.

Для визначення найбільш досконалої технології виготовлення варикапів розглянемо порівняльну таблицю характеристик варикапів. Отриманих за різними технологіями (табл. 1).

Таким чином, запропонована технологія виготовлення варикапів з використанням технологічних шарів пористого анодного оксиду кремнію дозволяє застосувати методи само-суміщення технологічних шарів та одержати прилад з найкращою сукупністю параметрів та характеристик при мінімальній собівартості виготовлення.

Крім того, для створення шару пористого анодного оксиду кремнію застосовується розчин слабких кислот (наприклад, борної кислоти), замість розчинів азотної та плавикової кислоти при створенні меза-структури. Це зменшує негативний вплив технології на навколишнє середовище.

Висновки

Застосування технології виготовлення варикапів з використанням технологічних шарів пористого анодного оксиду кремнію та методів само-суміщення дозволяє:

– отримувати високу напругу пробою, використовуючи переваги структури варикапа, яка подібна за властивостями до меза-структури;

Таблиця 1

Показники якості варикапів різних технологій

Технологія	Напруга пробою	Зворотній струм	Добротність	Коефіцієнт перекриття по ємності	Повторюваність параметрів	Кількість фотолітографій	Показник: сума (+)Σ(+)
Типова планарна	-	++	++	-	+	+ (2)	6
Планарна з областю зворотного градієнту (ОЗГ)	-	++	+	++	+	+ (3)	7
Межа-структура	++	-	++	-	-	++ (1)	6
Межа-структура зі зворотнім градієнтом	++	-	+	++	-	++(1)	7
З пористим анодним оксидом кремнію та зі зворотнім градієнтом	++	++	++	++	++	++ (1)	12

Примітка: (++) – високий показник, близький до максимального можливого;

(+) – середній показник;

(-) – низький показник;

Σ(+) – інтегральний показник якості технології.

- отримувати найбільші величини коефіцієнта перекриття по ємності, тому що при великій напрузі площа ОПЗ р-n переходу не збільшується, а залишається не змінною;
- отримувати максимально-можливу добротність завдяки відсутності додаткових опорів;
- наносити в вакуумі метал, якій не має глибоких рівнів в забороненій зоні (наприклад, алюміній) використав ефект розриву шару металу на вертикальних стінках пористого оксиду, що не приводить до зростання рівня зворотних струмів;
- мати захист р-n переходів термічним оксидом кремнію, що забезпечує мінімальний рівень зворотних струмів;
- мати малий розкид параметрів та характеристик тому, що внаслідок особливостей процесу фотолітографії площа р-n переходу визначається тільки розміром вікна на фотошаблоні;
- застосовувати в процесі виготовлення варикапів тільки одну фотолітографію, без необхідності суміщення з попередніми технологічними шарами, що зменшує собівартість виготовлення кристалів на пластинах;
- зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та на персонал на виробництві за рахунок використання більш слабких кислот для травлення кремнію;
- мати ліпшу сукупність параметрів та характеристик виробу зі всіх відомих типів варикапів.

Список використаної літератури

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка: в 3 ч. Елементи мікросхемотехніки: навч. посіб. / за ред. М.М. Прищепи. Київ: Вища школа, 2006. Ч. 2. 503 с.
2. Кузьмичев А.І., Писаренко Л.Д., Цибульський Л.Ю. Технологічні основи електроніки. кн.1: Технологія виробництва мікросхем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 127 с.
3. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів: монографія. Херсон : ФОП Вишемирський В.С., 2018. 184 с.
4. Sze S.M. Semiconductor Devices, physics and technology: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd, 2002. 574 p.
5. Milnes A. G. Deep impurities in semiconductors. John Wiley & Sons. New York, 1973. 526 p.
6. Михаліченко П.Є., Фролов О.М., Надточий А.В. та ін. Оперативний розрахунок елементів мікросхем та напівпровідникових приладів: монографія. / за ред. П.Є. Михаліченко. Миколаїв: Іліон, 2024. 188 с.
7. Литвиненко В.М. Оптимізація технології виготовлення епітаксально-планарного варикапа. Вісник ХНТУ. Херсон, 2023. № 4 (87). С. 85-90. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.10>
8. Селіверстова С.Р., Фролов О.М. Використання товстих шарів пористого анодного окислу кремнію для технології виготовлення варикапів. Вісник ХНТУ. Херсон, 2023. № 3 (86). С. 53-59. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.7>
9. Ткачук М.А., Селіверстова С.Р. Технологічні особливості виготовлення варикапів. Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства. зб. матеріалів XIII всеукр. студ. наук. конф., м. Херсон, 23 листоп. 2023 р. Херсон, 2023. С. 128-129.
10. Спосіб виготовлення кремнієвих діодів Шоттки з охоронним кільцем: патент на корисну модель № 60700 Україна: МПК: НОІЛ21/04; НОІЛ 21/31; НОІЛ 21/329. опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. 3 с.

References

1. Pryshchepa M.M., Pohrebniak V.P. (2006) *Mikroelektronika* [Microelectronics]: in 3 p. P. 2. *Elementy mikroskhemotekhniky* [Elements of microskhemotekhniky]. Kyiv: High school.
2. Kuzmychiv A.I., Pysarenko L.D., Tsybul'skyi L.Iu. (2019) *Tekhnolohichni osnovy elektroniky* [Technological foundations of electronics]. book.1. *Tekhnolohiia vyrobnytstva mikroskhem* [Chip manufacturing technology]. Kyiv: KPI n. Ihoria Sikorskoho.
3. Lytvynenko V.M. (2018) *Fizyka ta tekhnolohiia napivprovodnykovykh diodiv* [Physics and technology of semiconductor diodes: a monograph]. Kherson: FOP Vyshemyr'skyi V.S.
4. Sze S.M. *Semiconductor Devices, physics and technology*: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd, 2002. 574 p.
5. Milnes A. G. *Deep Impurities In Semiconductors*. John Wiley & Sons. New York, 1973. 526 p.
6. Mykhalichenko P.Ie., Frolov O.V., Nadtochyi A.V. (2024) *Optymizatsiia tekhnolohii vyhotovlennia epitaksialno-planarnoho varykapa* [Operational calculation of microcircuit elements and semiconductor devices]. Mykolaiv: Ilion.
7. Lytvynenko V.M. (2023) *Optymizatsiia tekhnolohii vyhotovlennia epitaksialno-planarnoho varykapa* [Optimization of the technology of manufacturing epitaxial-planar varicap]. *Bulletin of KhNTU*, no 4 (87), pp. 85-90.
8. Seliverstova S.R., Frolov O.M. (2023) *Vykorystannia товstyx шарів пористого анодного оксиду кремнію для технології виготовлення варикапів* [Use of thick layers of porous anode silicon oxide for varicap manufacturing technology]]. *Bulletin of KhNTU*, no № 3 (86), pp.53-59.
9. Tkachuk M.A., Seliverstova S.R. (2023) Technological features of manufacturing varicaps [Tekhnolohichni osoblyvosti vyhotovlennia varykapiv]. *Proceedings of the Modern problems of maritime transport and maritime safety: XIII All-Ukrainian Student Scientific Conference, (Ukraine, Kherson, november 23, 2023)*, Kherson: KhDMA, pp. 128-129.
10. Frolov O.M., Seliverstova S.R., Sieliverstov I.A. Sposib vyhotovlennia kremniievykh diodiv Shottki z okhoronnym kiltsem [Method for manufacturing silicon Schottky diodes with a security ring] utility model patent. no 60700 MPK: HOIL21/04; HOIL 21/31; HOIL 21/329. *Bulletin no12/ data 25.06.2011*. p.3.