УДК 621.382.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.34

О. М. ФРОЛОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматики та електроустаткування
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-2186-9488

С. Р. СЄЛІВЕРСТОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання
і засобів автоматики
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0003-1015-1593

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ДОРОЗГОНУ ФОСФОРУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ДРЕЙФОВИХ N-P-N ТРАНЗИСТОРІВ

Існує кілька видів технологій біполярних транзисторів, серед яких більшість займають технології виробництва дрейфових n-p-n транзисторів. Однією з основних характеристик біполярних транзисторів є коефіцієнт підсилення струму в схемі включення із загальним емітером, і залежить від товщини бази. Через допустимий технологічний розкид глибини дифузійних шарів на різних партіях пластин виходить різна величина товщини бази, що суттєво впливає на коефіцієнт підсилення транзисторів за струмом. Навіть при застосуванні одних і тих же технологічних режимів розкид отриманих коефіцієнтів посилення на різних партіях пластин може відрізнятись в 7–9 разів.

В якісній продукції розкид параметрів і характеристик є мінімальним. При використанні дискретних елементів це спрощує налагодження електронної апаратури у споживача, тому що не вимагає індивідуального налаштування кожного апарату. При застосуванні біполярних транзисторів у мікросхемах зменшення розкиду коефіцієнтів підсилення дозволяє зменшити величину питомого опору і товщину епітаксійних шарів, що призводить до підвищення частотно-імпульсних властивостей, а також дозволяє зменшити як розміри окремих транзисторів, так і розміри кристалів.

Для отримання дрейфових n-p-n транзисторів з малим розкидом коефіцієнтів підсилення було запропоновано застосувати додаткову технологічну операцію – дорозгону фосфору. В технологічному процесі після дифузії фосфору для формування емітера отримують зменшені значення коефіцієнтів підсилення, а після їх вимірювання проводять операцію дорозгону фосфору при температурах менших температури дифузії при формуванні емітера. Час процесу визначається за графіками залежності, складеними на основі експериментів. Для різних видів і типів біполярних транзисторів застосовуються різні режими формування дифузійних шарів. Режими формування базових областей відрізняються дозами домішки, часом і температурою процесу дифузії, параметрами отриманих дифузійних шарів. В результаті оптимальні режими технологічної операції дорозгону фосфору відрізнятимуться.

Ключові слова: *біполярний транзистор, коефіцієнт підсилення.*

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

DETERMINATION OF OPTIMUM MODES FOR PHOSPHORUS ADDITIONAL DISTRIBUTION IN THE PRODUCTION OF DRIFT N-P-N TRANSISTORS

There are several types of bipolar transistor technologies, with drift n-p-n transistor technologies occupying the majority. One of the main characteristics of bipolar transistors is the current gain in a common emitter circuit, and it depends on the thickness of the base. Due to the permissible technological variation in the depth of the diffusion layers,

different batches of wafers have different base thicknesses, which significantly affects the current gain of the transistors. Even when using the same technological modes, the variation of the obtained gain on different batches of wafers can differ by a factor of 7–9.

In high-quality products, the variation in parameters and characteristics is minimal. When using discrete elements, this simplifies the debugging of electronic equipment at the consumer's site, as it does not require individual adjustment of each device. When bipolar transistors are used in microcircuits, reducing the spread of gain makes it possible to reduce the resistivity and thickness of epitaxial layers, which leads to an increase in frequency-pulse properties, and also reduces both the size of individual transistors and the size of crystals.

In order to obtain drift n-p-n transistors with a small spread of gain, it was proposed to apply an additional technological operation – phosphorus doping. In the technological process, after the diffusion of phosphorus to form the emitter, reduced values of the gain are obtained, and after measuring them, the phosphorus is re-accelerated at temperatures lower than the diffusion temperature during the formation of the emitter. The process time is determined by the dependence graphs based on experiments. Different modes of diffusion layer formation are used for different types and types of bipolar transistors. The modes of formation of the base regions differ in dopant doses, time and temperature of the diffusion process, and parameters of the resulting diffusion layers. As a result, the optimal modes of the technological operation of phosphorus recovery will differ.

Key words: *bipolar transistor, gain coefficient.*

Постановка проблеми

Методи та основні технологічні операції виготовлення дрейфових транзисторів широко описані у технічній літературі [1–3]. Їх виготовляють на одношарових епітаксійних структурах n-n+- типу. В біполярних мікросхемах роль підкладки n^+-типу виконує захований шар n^+-типу. А основні технологічні операції формування дрейфового транзистора включають термічне окиснення, фотолітографію під базові області, формування базових областей шляхом введення домішку *p*-типу з наступною термічною дифузією, фотолітографію під емітер, формування емітерних областей шляхом введення домішку n^+-типу, фотолітографію для розкриття вікон до дифузійних областей емітера, бази та колектора, вакуумне нанесення шару металу та фотолітографію по металу. Зазвичай в якості домішки *p*-типу для формування базових областей застосовують бор, а в якості домішки *n*-типу застосовують фосфор.

У ряді випадків для отримання найбільш оптимального поєднання параметрів та характеристик транзисторів формують дві базові області (активну та пасивну) з різним вмістом домішки та різною глибиною *p–n* переходів [4], для чого додається ще одна операція фотолітографії та операція введення домішки *p*-типу з іншою дозою. У випадку використання біполярних транзисторів в біполярних мікросхемах вони створюються таким же набором технологічних операцій [1, 5]. У сучасних умовах вимоги до сукупності параметрів та характеристик транзисторів стали жорсткішими.

Наприклад, досить добрі за сукупністю параметрів та характеристик транзистори серії КТ3102 мають великий розкид за коефіцієнтами підсилення, – від 100 од. до 1000 од. і, відповідно, різні допустимі напруги пробою колектор-емітер U_{CE0}. При цьому їх розбивають на різні групи (А, Б, В, Г). Однак навіть у групах розкид транзисторів за коефіцієнтом підсилення перевищує ±40 %.

Наприклад, у *n-p-n* транзисторів біполярних мікросхем серії 155 допустимий діапазон коефіцієнтів підсилення транзисторів становив від 15 од. до 90 од. Як правило, значення коефіцієнта підсилення виробів одного виду залежать від товщини бази транзистора, при меншої величини товщини бази буде більшим коефіцієнт підсилення. Також, від товщини бази залежать гранична частота і максимально допустимий струм колектора [6, 7].

Таким чином, великий розкид по коефіцієнту підсилення вказує на значний розкид і за іншими параметрами і характеристиками транзисторів, що не дозволяє при їх застосуванні повністю використовувати можливості транзисторів, а в ряді випадків вимагає додаткового налаштування радіоелектронної апаратури.

Великий розкид за коефіцієнтами посилення пояснюється впливом різних факторів (тиск, температура, склад навколишнього середовища, склад паро – газового середовища, в якому проводиться термічні операції, зміна реактора або дифузійної печі) на процеси дифузії, і, відповідно, допусками на глибини *p-n* переходів, наведені в нормативних документах атестації виробництва. Так, у [8] допуск по відхиленню глибини *p-n* переходу колектор-база, створюваного шляхом іонного легування бором з подальшим термічним відпалом або розгонкою домішки становить ±10 %, а допуск по відхиленню глибини *p-n* переходу емітер-база, створюваного шляхом термічної дифузії домішку фосфору становить ±20 %.

Наприклад, для біполярних ТТЛ мікросхем типові значення середньої глибини *p–n* переходу колектор-база становлять близько 1,8 мкм, і глибини p-n переходу емітер-база близько 1,0 мкм. При цьому у зазначених допусках товщина бази буде різнитися у 2,8 разів. Враховуючи, що в першому наближенні коефіцієнт підсилення обернено пропорційний квадрату товщини бази виходить, що допустимий розкид за коефіцієнтом підсилення може дорівнюватиме 7–9 разів.

Напруга пробою транзистора, включеного із загальним емітером U<SUB>CE0<\SUB> за лавинним механізмом пробою для n-p-n транзисторів залежить від величини коефіцієнта підсилення і визначається за формулою [5, 6]:

$$U_{CEO} = \frac{U_{CBO}}{\sqrt[4]{h_{21E.\max}}}; \quad (1)$$

де U_{CBO} – напруга лавинного пробою *p–n* переходу колектор-база; $h_{21\max}$ – максимальний коефіцієнт посилення струму.

При крайніх значеннях коефіцієнтів підсилення величина напруги пробою відрізнятиметься приблизно 1,7 разів. Це призводить до того, що для забезпечення необхідного значення напруги пробою величину питомого опору епітаксійного шару необхідно застосовувати зі значним запасом. Підвищення опору епітаксійного шару приводить до підвищення опору області колектора транзистора, а це призводить до зменшення граничної частоти, зменшення максимально-допустимого струму колектора і підвищення ступеню нагрівання транзистора при протіканні струму.

За сучасних вимог до параметрів транзисторів, а також до розмірів транзисторів у біполярних мікросхемах необхідно обмежувати величину питомого опору епітаксійного шару. Крім того, в сучасних мікросхемах для зменшення струмів споживання необхідні значення коефіцієнтів посилення можуть становити кілька сотень одиниць.

Якщо використовувати типову технологію при необхідності обмеження транзисторів а по коефіцієнтам підсилення не більш ніж 2–2,5 рази, відразу після проведення операцій дифузії фосфору, на різних партіях пластин, виготовлених у різні дні, частина пластин має достатні запаси за напругою пробою, але недостатні значення коефіцієнтів посилення. Інша частина має достатні коефіцієнти посилення та величину напруги пробою. А третя частина пластин має високі коефіцієнти підсилення, але напруги пробою нижче потрібної, – це вже невиправний брак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для виключення невиправного браку запропоновано технічне рішення, яке передбачає заздалегідь формувати транзистори з малим коефіцієнтом підсилення, але з достатнім запасом по напрузі пробою, а після вимірювання параметрів на тестових структурах проводити операцію дорозгону фосфору в області емітера до необхідного значення. При цьому температура дорозгону фосфору повинна бути меншою за температуру дифузії фосфору при формуванні емітерних областей, а час дорозгону повинен бути більшим, щоб більш точно отримувати необхідні значення коефіцієнтів посилення. Крім того, менша температура цей операції практично не впливає на розподіл домішку в базової області за різних значень коефіцієнтів дифузії бору та фосфору, тобто не приводить до зміни напруги пробою *p-n* переходу колектор–база (U_{CBO}).

Для зменшення впливу етапів завантаження та вивантаження пластин у робочу зону дифузійної печі (порядку 5 хв.) оптимальний час операції дорозгону від мінімальних значень коефіцієнтів посилення до заданих значень має бути не менше 20–40 хвилин.

Прямий розрахунок режимів дорозгону фосфору досить складний, тому що крім різної концентрації домішки в базової області дрейфового транзистора є ще й різні вимоги до величини коефіцієнта підсилення для різних виробів. Також, необхідно враховувати додаткові ефекти, які відбуваються при дифузії фосфору. Оскільки, при створенні емітерів поверхнева концентрація фосфору створюється досить високою, проявляється ефект прискорення дифузії [9], що враховується під час розрахунків запровадженням коефіцієнта прискорення дифузії в розрахункову формулу. Однак при подальших технологічних операціях при високій температурі, поверхнева концентрація фосфору змінюється, що призводить до зміни цього коефіцієнта прискорення.

Кількість іонізованих атомів фосфору в дифузійному шарі не дорівнює кількості впровадженої домішки [9, 10], а залежить від поверхневої концентрації та від глибини шару.

У цьому випадку найбільш доцільним методом визначення режимів дорозгону фосфору є метод фізико-статистичного аналізу, в якому за експериментальними даними визначаються і математично описуються основні залежності.

Слід враховувати, що для різних виробів базові області транзисторів створюються різної дозою домішки та з різними режимами формування цих областей як по часу дифузії, так й по температурі процесу. Тому, при застосуванні однакової температури процесу дорозгону фосфору на виробах з різними режимами формування базових областей, час отримання необхідних коефіцієнтів підсилення буде відрізнятися.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення режимів процесу дорозгону фосфору при виготовлення дрейфових *n-p-n* транзисторів для отримання малого розкиду коефіцієнтів підсилення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження впливу режимів дорозгону фосфору для *n-p-n* транзисторів проводилися на приладах, що серійно випускаються. Це дозволяє набрати велику кількість даних та провести відповідну обробку цих даних.

Для приладів (тип 1) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 70 мкКл/см^2 з наступною операцією термічного перерозподілу домішки (розгонка) при температурі 1150 °С. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 70 од. до 160 од. Типове значення – 110–140 од.

Для приладів (тип 2) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 17 мкКл/см^2 з наступною термічною розгонкою домішки при температурі 1150 °С. Через порівняно невелику дозу поверхнева концентрація домішку в базовій області виходить невеликою. Для усунення можливого ефекту отримання бар'єру Шоттки на базовому контакті застосовувалося підлегування областей під контакти до бази шляхом додаткової дифузії бору. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 140 од. до 350 од. Типове значення – 250–280 од.

Для приладів (тип 3) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 4 мкКл/см^2. Для цього типу приладів також проводилося підлегування контактних областей до бази шляхом додаткової дифузії бору. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 240 од. до 500 од. Типове значення – 350 од. ±10 %.

Емітерні області всіх цих типів приладів створювалися шляхом дифузії фосфору за температури процесу 1040 °С.

Після дифузії фосфору проводилася фотолітографія для відкриття вікон у маскувальному шарі окислу кремнію до емітерів, баз та колекторів. Вимірювання електричних параметрів транзисторів, таких як коефіцієнти посилення (h_{21E}), напруги пробою (U_{CEO}) проводилися на тестових структурах, розташованих на краях кристалів з приладами. Вимірювання проводили на установці Л2-56 (ПНХТ-2). Атестована похибка приладу не перевищує ±5 %.

У цей роботі досліджувалося вплив часу дорозгонки при температурі 950 °С на зміну коефіцієнтів підсилення. Процес дорозгонки фосфору проводився в дифузійній печі. З метою уникнення зайвої операції фотолітографії, був застосований такий паро – газовий режим: перші 5 хвилин сухий кисень, решта часу сухий аргон. Для видалення шару оксиду кремнію, що з'явився, пластини занурювалися в *p*-травник на 5–10 с, а контроль видалення тонкого оксиду з вікон проводився по початку скочування *p*-травника зі зворотного боку пластини. Після цього проводилося вимірювання отриманих електричних параметрів.

Отримані залежності коефіцієнтів підсилення транзисторів від режимів процесу дорозгонки фосфору для різних партій пластин наведено рисунку 1.

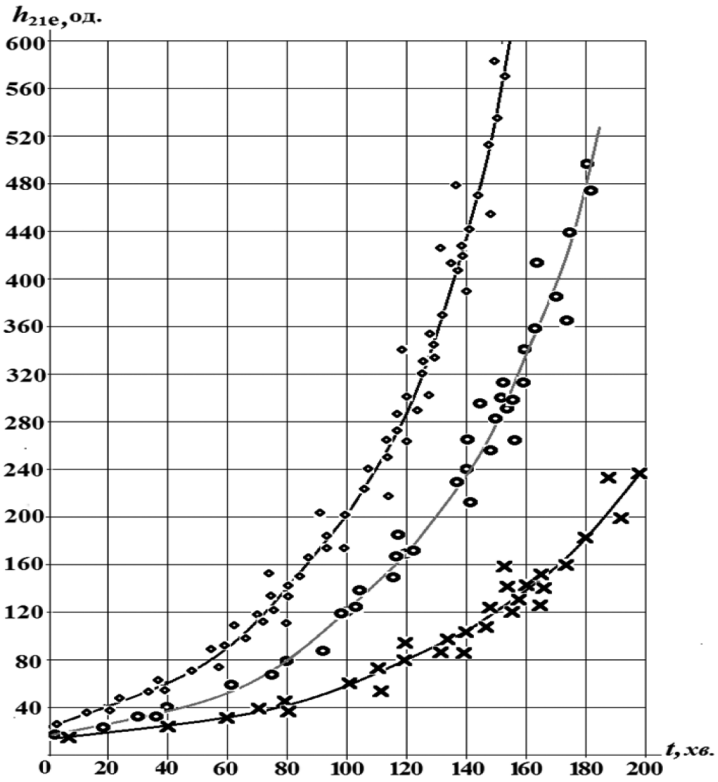

Рис. 1. Залежність коефіцієнтів підсилення дрейфових *n-p-n* транзисторів від часу дорозгону фосфору при температурі 950 °С
***x* – при дозі домішку бора в базі – 70 мкКл/см^2; ○ – при дозі домішку бора в базі – 17 мкКл/см^2;**
◊ – при дозі домішку бора в базі – 4 мкКл/см^2

Згідно графічної залежності коефіцієнтів посилення транзисторів від часу дорозгонки фосфору достатньо добре описується виразом:

$$h_{21E} = A \cdot e^{\alpha t}; \quad (2)$$

де: h_{21E} – коефіцієнт підсилення транзистора, од.; A та α – коефіцієнти пропорційності; t – час процесу дорозгонки (хвилин).

Для вказаних залежностей коефіцієнтів підсилення транзисторів були отримані наступні вирази:

– для приладів (тип 1 – доза бора 70 мкКл/см^2): $h_{21E} = 13{,}2 \cdot e^{0{,}0148 \cdot t}$;
– для приладів (тип 2 – доза бора 17 мкКл/см^2): $h_{21E} = 19{,}1 \cdot e^{0{,}0181 \cdot t}$;
– для приладів (тип 3 – доза бора 4 мкКл/см^2): $h_{21E} = 27{,}9 \cdot e^{0{,}0197 \cdot t}$.

Обробка отриманих даних показала залежність коефіцієнтів пропорційності (A та α) від дози домішку бора, яка застосована для формування бази дрейфового транзистора.

Залежність показника ступеню (α) від дози домішку бора визначається формулою:

$$\alpha = \frac{1}{Q^{0,7} + 48}. \quad (3)$$

А залежність коефіцієнта пропорційності (А) від дози домішку бора визначається формулою:

$$A = Q^{-0.26}; \quad (4)$$

де: Q – доза домішку в базової області, мкКл/см^2.

Використання отриманих залежностей дозволяє досить просто визначати необхідний час дорозгону при температурі 950 °С по формулі:

$$\Delta t = \frac{\ln\left(\frac{h_{21E(2)}}{h_{21E(1)}}\right)}{\alpha}; \quad (5)$$

де: $h_{21E(1)}$ – коефіцієнт підсилення після формування емітера; $h_{21E(2)}$ – потрібний коефіцієнт підсилення після процесу дорозгону; α – коефіцієнт пропорційності, якій залежить від дози домішку в базової області транзистора за виразом (3).

Висновки

Встановлено, що залежність коефіцієнта посилення від часу дорозгону проходить по закону, який близький до експоненти з відповідними коефіцієнтами. Коефіцієнти пропорційності, які визначено для розрахунків коефіцієнтів підсилення транзисторів від часу дорозгону, самі залежать від дози домішки бору, яка застосовується для формування активної бази дрейфових *n-p-n* транзисторів.

Застосування процесу дорозгону фосфору після створення емітерів планарних дрейфових *n-p-n* транзисторів дифузією фосфору дозволяє зменшити розкид коефіцієнтів підсилення на пластинах різних партій з 7–9 разів до 2–2,5 разів. Що дозволяє повністю виключити невиправний брак пластин з напругою пробою менше необхідних значень і значно підвищує вихід придатних.

Зменшення розкиду коефіцієнтів підсилення дозволяє знизити запас на питомий опір епітаксійного шару. Це призводить до підвищення частотних властивостей. Як наслідок, зменшуються розміри кристалів мікросхем та дискретних транзисторів.

Список використаної літератури

1. Прищепа М. М., Погребняк В. П. Мікроелектроніка: в 3 ч. Ч. 1. Елементи мікросхемотехніки: навч. посіб. Київ : Вища школа, 2006. 431 с.
2. Готра З. Ю. Технологія електронної техніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 1. Львів : Львівська політехніка, 2010. 888 с.
3. 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.
4. Спосіб виготовлення високочастотних біполярних *n-p-n* транзисторів. Деклар. пат. № 33442 А Україна. HOIL 7/34, опубл. 15.02.2001. Бюл. № 1.
5. Richard S. Muller, Theodore I. Kamins, Mansun Chan. Device electronics for integrated. [Electronic resource] Circuits-John Wiley & Sons, 2002. 538 p. https:// document/733331153/Richard-S-Muller-Theodore-I-Kamins-Mansun-Chan-Device-Electronics-for-Integrated-Circuits-John-Wiley-Sons-2002
6. Sze S. M. Semiconductor Devices, physics and technology: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd, 2002. 574 p.

7. Ніколайчук Г.П. Фізичні основи напівпровідникових приладів [Електронний ресурс] : навч. посіб. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2023. 112 с. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64176

8. GhST 11 20.9903. Mikroskhemy integhraljni ta napivprovidnykovi prylady. Systema operacijnogho kontrolju u procesi vyrobnyctva. Tekhnichni vymoghy do tekhnologhichnogho procesu pid chas atestaciji vyrobnyctva. – 65 p.

9. Maekava S., Oshida F. Diffusion of boron in silicon. *J. Phys.Soc. of Japan*. 1967, v. 19, № 3. pp. 253–257.

10. Tsai C.C.J. Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon. *Proc. IEEE*. 1969. v. 57, № 9. pp. 1499–1506.

Referenses

1. Pryshchepa M.M., Pohrebniak V.P. (2006) *Mikroelektronika* [Microelectronics]: in 3 p. P. 2. *Elementy mikroskhemotekhniky* [Elements of microskhemotekhniky]. Kyiv : High school.

2. Ghotra Z.Ju. (2010) *Tekhnologhija elektronnoji tekhniky*: navch. posib. in 2 t. T. 1. Ljviv : Ljvivsjka politekhnika.

3. 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.

4. Frolov O.M., Maronchuk I.YE., Kurak V.V. Sposib vyghotovlennja vysokochastotnykh bipoljarnykh *n-p-n* tranzystoriv. Deklar. pat. No 33442 A Ukrajina. HOIL 7/34, opubl. *Bulletin*. No 1. Data 15.02.2001.

5. Richard S. Muller, Theodore I. Kamins, Mansun Chan. (2002) *Device electronics for integrated*. [Electronic resource] Circuits-John Wiley & Sons,. https://document/733331153/Richard-S-Muller-Theodore-I-Kamins-Mansun-Chan-Device-Electronics-for-Integrated-Circuits-John-Wiley-Sons-2002

6. Sze S.M. (2002). Semiconductor Devices, physics and technology: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd. 574 p.

7. Nikolajchuk Gh.P. (2023). Fizychni osnovy napivprovidnykovykh pryladiv [Elektronnyj resurs] : navch. posib. Nac. tekhn. un-t “Kharkiv. politekhn. in-t”. Kharkiv. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64176

8. GhST 11 20.9903. Mikroskhemy integhraljni ta napivprovidnykovi prylady. Systema operacijnogho kontrolju u procesi vyrobnyctva. Tekhnichni vymoghy do tekhnologhichnogho procesu pid chas atestaciji vyrobnyctva. – 65 p.

9. Maekava S., Oshida F. Diffusion of boron in silicon. *J. Phys. Soc. of Japan*. 1967, v. 19, no 3. pp. 253–257.

10. Tsai C.C.J. Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon. *Proc. IEEE*. 1969. v. 57, no 9. pp. 1499–1506.