

О.М. ФРОЛОВ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

С.Р. СЕЛІВЕРСТОВА

Херсонська державна морська академія

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ДОМІШКИ В БАЗІ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РОЗРАХУНКУ СТРУКТУРИ ДРЕЙФОВОГО N-P-N-ТРАНЗИСТОРА

На основі моделювання реального розподілу домішки в базовій області розглянуто проблему оперативного розрахунку структури дрейфових біполярних n-p-n-транзисторів. Показано, що параметри та електричні характеристики дрейфових транзисторів тісно пов'язані з концентраційним профілем легуючої домішки, який визначає глибину p-n-переходів, напругу пробою та коефіцієнт посилення струму.

Додатково цей концентраційний профіль впливає на частотно-імпульсні характеристики та на щільність струму через транзистор. У роботі проаналізовано сучасні технологічні процеси формування базових областей у кремнієвих структурах дрейфових транзисторів, зокрема вплив доз іонного легування бором, температури та часу термічного розгону домішки в базовій області, а також роль коефіцієнта сегрегації за взаємодії домішки з шаром оксиду кремнію.

На основі експериментальних даних щодо глибини p-n-переходів та електричних параметрів дрейфових транзисторів різних технологічних серій проведено узагальнення результатів і визначено спрощену аналітичну модель для опису реального розподілу домішки бору в базовій області. Запропоновано емпіричні залежності, які зв'язують глибину розташування максимальної концентрації домішки з добутком коефіцієнта дифузії на час термічної обробки та з дозою легування. Отримано вираз для розрахунку глибини x_e та максимальної концентрації $N_{b,max}$, які забезпечують можливість оцінювання напруги пробою емітерного p-n-переходу без проведення складних технологічних випробувань.

Порівняння експериментальних та розрахункових даних показало коректність результатів (розбіжність не перевищує 0,1%), що підтверджує достовірність запропонованої моделі. Визначено, що оптимальні електричні характеристики дрейфових транзисторів досягаються за умови збігу глибини емітерного p-n-переходу з глибиною максимальної концентрації базової домішки. Запропонована модель може бути використана для швидкого прогнозування параметрів дрейфових транзисторів на етапі проектування мікросхем і дає змогу скоротити кількість експериментальних етапів технологічного циклу.

Ключові слова: дрейфовий n-p-n-транзистор, розподіл домішки, моделювання, іонне легування бором.

A.N. FROLOV

National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov

S.R. SELIVERSTOVA

Kherson State Maritime Academy

SIMULATION OF IMPURITY DISTRIBUTION IN THE BASE FOR OPERATIONAL CALCULATION OF THE STRUCTURE OF A DRIFT N-P-N TRANSISTOR

Based on modelling the actual distribution of impurities in the base region, the problem of rapid calculation of the structure of drift bipolar n-p-n transistors is considered. It is shown that the parameters and electrical characteristics of drift transistors are closely related to the concentration profile of the doping impurity, which determines the depth of p-n transitions, breakdown voltage, and current gain.

Additionally, this concentration profile affects the frequency-pulse characteristics and the current density through the transistor. The paper analyses modern technological processes for forming base regions in silicon structures of drift transistors, in particular the influence of boron ion doping doses, temperature and time of thermal diffusion of the impurity in the base region, as well as the role of the segregation coefficient in the interaction of the impurity with the silicon oxide layer.

Based on experimental data on the depth of p-n junctions and electrical parameters of drift transistors of various technological series, the results were summarised and a simplified analytical model was determined to describe the actual distribution of boron impurities in the base region. Empirical dependencies were proposed that link the depth of the maximum impurity concentration with the product of the diffusion coefficient and the heat treatment time and with the doping dose. An expression has been obtained for calculating the depth x_e and maximum concentration $N_{b,max}$, which make it possible to estimate the breakdown voltage of the emitter p-n junction without conducting complex technological tests.

A comparison of experimental and calculated data showed the correctness of the results (the discrepancy does not exceed 0.1%), which confirms the reliability of the proposed model. It has been determined that the optimal electrical characteristics of drift transistors are achieved when the depth of the emitter p-n junction coincides with the depth of the maximum concentration of the base impurity. The proposed model can be used for rapid prediction of drift transistor parameters at the microcircuit design stage and allows reducing the number of experimental stages in the technological cycle.

Key words: drift n-p-n transistor, impurity distribution, modeling, boron ion implantation.

Постановка проблеми

Сучасна електронна та радіоелектронна апаратура широко використовує напівпровідникові вироби. Поряд із постійним розширенням номенклатури та випуском мікросхем постійно збільшуються номенклатура та випуск дискретних напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, тиристорів, усіяких датчиків.

Особливе місце серед дискретних приладів займають транзистори, які в апаратурі дають змогу не лише збільшувати сигнали, а й здійснювати плавне і точне регулювання електричних сигналів. За способом управління розрізняють біполярні та польові транзистори. Біполярні транзистори менш схильні до впливу статичної електрики, мають кращий показник $f_T \cdot U_{проб.}$ і як дискретні прилади широко застосовуються. Розрізняють дві структури біполярних транзисторів – дрейфові та бездрейфові [1]. Спочатку випускалися бездрейфові транзистори, у яких базові області легували постійною концентрацією домішки. У дрейфових транзисторах у базі створюється прискорювальне поле за рахунок нерівномірного легування базових областей, що дає змогу мати більш високі коефіцієнти посилення за однакових напруг пробою транзисторів і вищі показники $f_T \cdot U_{проб.}$ Параметри та характеристики дрейфових транзисторів безпосередньо пов'язані з розподілом домішки у базових областях транзисторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасний кремнієвий дрейфовий n-p-n-транзистор створюється в епітаксійному шарі n-типу провідності, нанесеному на високолеговану підкладку n⁺-типу, дифузією домішки бору для формування базових областей та подальшою дифузією домішки фосфору для формування емітерів. Відповідно до теоретичних виразів розрахунку дифузійних шарів у кремнії, розподіл домішок у структурі дрейфового n-p-n-транзистора наведено на рис. 1.

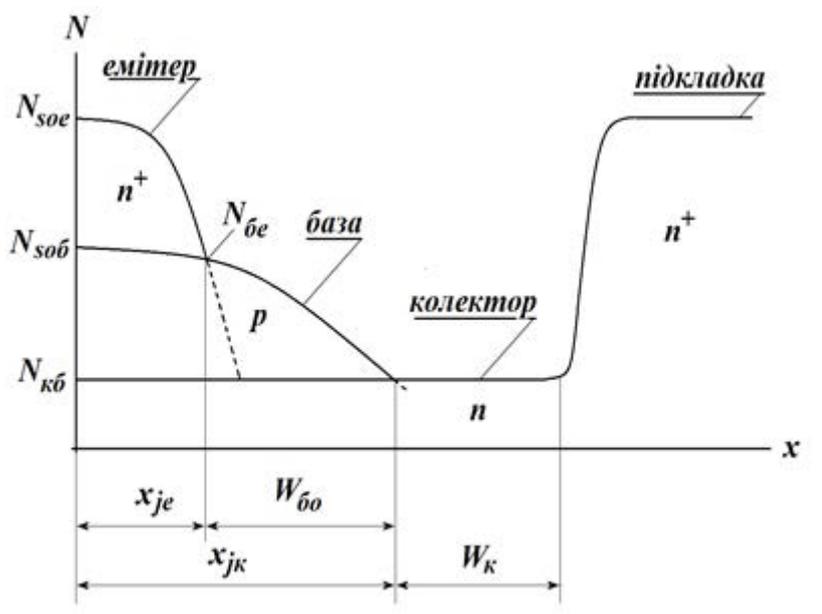


Рис. 1. Розподіл домішок у дрейфових n-p-n-транзисторах

Основними елементами розподілу є:

- $N_{еб}$ – концентрація домішки на p-n-переході «емітер – база»;
- $N_{кб}$ – концентрація домішки на p-n-переході «колектор – база»;
- N_{sob} – поверхнева концентрація базової домішки;
- N_{soe} – поверхнева концентрація емітерної домішки;

- x_{je} – глибина р-n-переходу «емітер – база»;
- x_{jk} – глибина р-n-переходу «колектор – база»;
- W_{bo} – товщина бази;
- W_k – товщина високоомного колектора.

Як захисні та маскуючі шари для кремнієвих приладів широко застосовуються шари оксиду кремнію [2; 3], серед яких найкращими властивостями володіє термічний оксид кремнію, створюваний за високих температур (понад 800–900°C) в окислюючій атмосфері (кисень та/або пари води).

Під час розроблення нових виробів за заданими значеннями параметрів та характеристик транзисторів (напруги пробію, коефіцієнт посилення) проводиться попередній оперативний розрахунок розподілу домішки в базі транзистора, за якого визначаються параметри $N_{e\sigma}, x_{je}, N_{k\sigma}, x_{jk}$.

Реальний розподіл домішки бору в базових областях n-p-n-транзисторів відрізняється від теоретичного за рахунок прояву ефекту перерозподілу домішки на межі розділу Si-SiO₂, та через вплив коефіцієнта сегрегації [4; 5]. Ці ефекти призводять до того, що частина домішки бору, якою формують базову область за термічного окислення, йде в шар оксиду кремнію, що росте. У результаті цього реальна поверхнева концентрація бору стає меншою, ніж за теоретичним розрахунком (рис. 2).

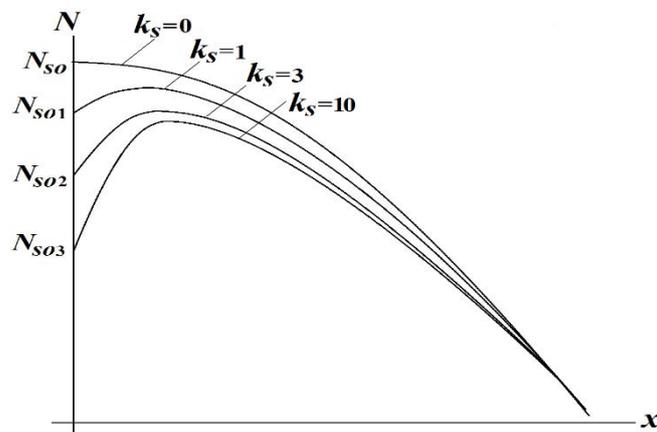


Рис. 2. Розподіл домішки бору за різних коефіцієнтів сегрегації

Розроблені методики розрахунку реального розподілу домішки бору в базі вимагають даних про дозу домішки бору, про температуру та час процесу розгонки домішки, про товщину оксиду над базовою областю, про середовище, у якому проводиться розгін домішки [4; 5]. Однак за попереднього розрахунку параметрів розподілу домішки за заданими параметрами та характеристиками транзистора, що проводиться за методикою, наведеною у [6], ці дані відсутні. Більшість цих даних визначається за даними розрахунку розподілу домішки в базі.

Мета дослідження

Метою дослідження є визначення спрощеної моделі розподілу домішки бору в базі для проведення оперативного розрахунку параметрів структури дрейфового n-p-n-транзистора.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для визначення залежностей параметрів та характеристик дрейфового біполярного n-p-n-транзистора від розподілу домішки в базі проведено експериментальні дослідження за різних технологічних режимів створення транзисторів у біполярних мікросхемах.

Були використані кремнієві пластини з різними питомими опорами (ρ_{en}) епітаксійних шарів. Формування базових областей проводилося після фотолітографії під базові області різними

дозами бору (Q_{σ}) за допомогою іонного легування на установках іонного легування типу «Везувій-3М» із подальшим перерозподілом домішки (розгін домішки) за різних високих температур (T_p) та різних часів (t_p). Дифузія фосфору для формування емітерів проводилася після фотолітографії під емітери шляхом одностадійної дифузії фосфору за температури 1040°C. Після дифузії фосфору проводилася фотолітографія для розгину вікон до дифузійних областей. Параметри транзисторів визначалися на тестових транзисторах вимірювачів параметрів напівпровідникових приладів типу Л2-56. Глибина емітерного та колекторного р-п-переходів визначалася методом «шар – шліф» на тестових реперах, створених у кожній пластині. Після отримання мінімальних коефіцієнтів посилення проводилася дорозгін фосфору за температури 900°C. Як показали результати вимірювання глибини р-п-переходів, під час дорозгону фосфору змінювалися глибина емітерного р-п-переходу і коефіцієнт посилення транзистора, проте через малу температуру процесу глибина колекторного р-п-переходу практично не змінилася.

Дані щодо застосовуваних технологічних процесів та проведених вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Технологічні режими та дані вимірів

№	Технологічні режими				Дані вимірів					
	$P_{еп}$, Ом·см	Q_{σ} , мкКл/см ²	T_p , °C	t_p , хв	Глибина р-п переходів, мкм		Електричні параметри			
					x_{je}	x_{jk}	e	$U_{кбо}$, В	$U_{кэо}$, В	$U_{эбо}$, В
1.1	2,5	4,0	1180	200	1,51	3,60	243	149	37,0	23,0
1.2					1,91		357		34,2	23,0
1.3					2,24		720		28,7	23,1
2.1	1,2	15	1150	110	1,39	2,62	140	68	19,7	11,5
2.2					1,62		235		17,3	11,6
2.3					1,84		330		15,9	11,5
3.1	1,2	50	1150	85	1,21	2,51	95	62,8	20,1	8,3
3.2					1,46		137		18,3	8,2
3.3					1,61		220		16,2	8,2
4.1	0,3	15	1150	80	1,17	1,87	147	28,1	8,1	10,9
4.2					1,29		295		6,8	11,1
4.3					1,42		465		6,1	11,0

Як видно з даних вимірювання електричних параметрів транзисторів:

– коефіцієнти посилення струму у схемі із загальним емітером (h_{21e}) та напруга пробою ($U_{кэо}$), залежать від товщини бази та напруги ($U_{кбо}$), що повністю узгоджується з теорією та підпорядковується відомим розрахунковим формулам.

– напруга пробою ($U_{кбо}$) залежить від глибини колекторного р-п переходу, від питомого опору епітаксійного шару та від дози домішки, що також узгоджується з теорією та підпорядковується відомим розрахунковим формулам.

– напруга пробою ($U_{эбо}$) не залежить від глибини емітерного р-п переходу, але залежить від дози домішки, температури і часу розгонки базової домішки, тобто, від добутку (Dt).

Відомо, що напруга лавинного пробою визначається концентрацією домішки на р-п переході та від цього переходу. Відповідно до [7] для емітерного р-п переходу величина напруги пробою практично збігається з напругою плоского ступінчастого р-п переходу. Максимальна концентрація домішки в базі, яка визначає напругу лавинного пробою емітерного р-п переходу ($U_{эбо}$) визначається за формулою [8]:

$$N = \sqrt[3]{\frac{2,7 \cdot 10^{12}}{U_{\text{ебо}} - \frac{10,5}{(U_{\text{ебо}})^{0,72}}}} \quad (1)$$

Дані розрахунків максимальної концентрації у базі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Дані розрахунків максимальної концентрації в базі

	Номер пластини											
	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43
$Q, \text{мкКл/см}^2$	4			15			50			15		
$-\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	2,5			1,2			1,2			0,3		
$x_{je}, \text{мкм}$	1,51	1,91	2,24	1,39	1,62	1,84	1,21	1,46	1,61	1,17	1,29	1,42
$U_{\text{ебо}}, \text{В}$	23,0	22,9	22,9	11,5	11,6	11,6	8,3	8,2	8,3	11,0	11,0	11,0
$N_{\text{еб,max}}, \times 10^{16} \text{см}^{-3}$	4,33	4,36	4,36	14,7	14,5	14,5	30,0	31,0	30,0	16,1	16,1	16,1

З аналізу даних, наведених у табл. 2, можна бачити, що за будь-якої глибини емітерного р-п-переходу величина напруги пробую $U_{\text{ебо}}$ визначається реальною максимальною концентрацією домішки на основі транзистора.

Хоча ОПЗ р-п-переходу «емітер – база» має невелику величину, але ця ОПЗ за будь-якої глибини емітера перетинає базову область із максимальною концентрацією базової домішки в реальному розподілі домішки, що і визначає величину напруги пробую. Для різної глибини емітерного р-п-переходу розподіл домішок у дрейфовому п-р-п-транзисторі представлено на рис. 3.

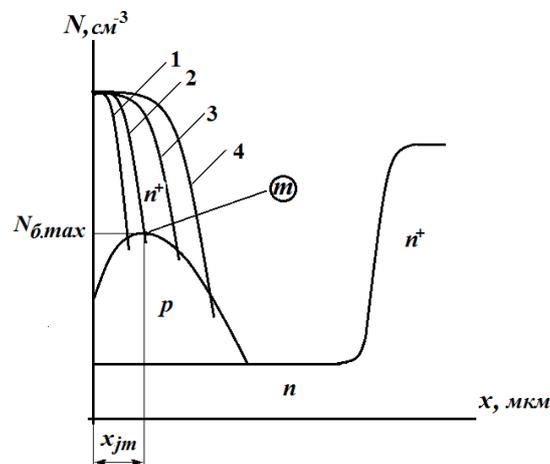


Рис. 3. Реальний розподіл домішок у дрейфовому п-р-п-транзистора

У дрейфовому транзисторі за рахунок нерівномірного розподілу домішки в базі створюється прискорювальне поле [1; 7], яке призводить до підвищення коефіцієнта посилення струму і зменшення часу прольоту носіїв заряду через базу. Окрім того, нерівномірний розподіл домішки в базі транзистора за рахунок більш високої концентрації домішки на емітерному р-п-переході дає змогу зменшити товщину бази за збереження заданої напруги проколу бази. Величина напруги пробую транзистора $U_{\text{кео}}$ визначається меншим значенням із двох видів напруг пробую – напруги лавинного пробую та напруги проколу бази. Як правило, у якісних дрейфових транзисторів напруга $U_{\text{кео}}$ визначається напругою лавинного пробую, яке на 5–25% менше, ніж напруга проколу бази.

Якщо глибина емітерного р-п-переходу (крива 1 на рис. 3) менше, ніж глибина максимальної концентрації базової домішки, то з'являється ділянка з полем, що гальмує, що призводить до зменшення коефіцієнта посилення і до збільшення часу прольоту, що знижує граничну частоту.

Якщо глибина емітерного р-п-переходу (крива 3 на рис. 3) більша, ніж глибина максимальної концентрації базової домішки, то коефіцієнт посилення збільшується за рахунок зменшення товщини бази, але напруга проколу бази починає зменшуватися і може стати меншою, ніж напруга лавинного пробую (для кривої 4).

Найбільш оптимальна структура дрейфового транзистора за збігу глибини емітерного р-п-переходу з глибиною максимальної концентрації домішки в базовій області (крива 2 на рис. 3), тобто з точкою m , показаною на рис. 3. При цьому коефіцієнти посилення і всі напруги пробую ($U_{кбо}, U_{кео}, U_{ебо}$) транзистора однозначно визначатимуться концентраціями домішки на р-п-переходах та їхніми глибинами.

Глибина розташування крапки з максимальною концентрацією домішки визначається за відомою формулою:

$$x_{jm} = \sqrt{4Dt \cdot \ln \left(\frac{N_{so}}{N_{l,max}} \right)}, \tag{2}$$

де N_{so} – поверхнева розрахункова концентрація:

$$N_{so} = \frac{Q \cdot 6,23 \cdot 10^{12}}{\sqrt{\pi Dt}}, \tag{3}$$

де Q – доза базової домішки (за табл. 1), мкКл/см²;

– T – час розгону базової домішки (за табл. 1), с;

– D – коефіцієнт дифузії бору, що визначається за виразом [9]:

$$D_l = 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot (Q)^{0,326} \cdot \exp \left\{ \frac{- \left[3,3 - \frac{0,421}{(Q)^{0,078}} \right]}{kT} \right\}, \tag{4}$$

де k – постійна Больцмана, $= 8,62 \cdot 10^{-5}$, е·В/град;

– T – температура розгону домішки (за табл. 1), °К.

Дані основних технологічних режимів та розрахунків за формулами (1–4) приведено в табл. 3.

Таблиця 3

Технологічні режими та розрахункові величини

Номери пластин	Технологічні режими				Розрахункові величини				
	Q , мкКл/см ²	ρ , Ом·см	T , °С	t , хв.	$D_{b,13}$, x10 ⁻¹³ см ² /с	Dt , x10 ⁻⁹ см ²	N_{so} , x10 ¹⁷ см ⁻³	$N_{b,max}$, x10 ¹⁶ см ⁻³	x_{jm} , x10 ⁻⁴ см
1.1-1.3	4	2,5	1180	200	6,37	7,6447	1,6084	4,35	1,999
2.1-2.3	15	1,2	1150	110	4,43	2,9254	9,7504	14,6	1,490
3.1-3.3	50	1,2	1150	85	5,12	2,6093	34,414	30,0	1,596
4.1-4.3	15	0,3	1150	80	4,43	2,1276	11,433	16,1	1,292

Вочевидь, що глибина (x_{jm}) залежить від твору (Dt) та від величини дози базової домішки. За статечної залежності глибини (x_{jm}) формула розрахунку набуває вигляду:

$$x_{jm} = A \cdot (D)^\alpha \cdot (Q)^\beta, \tag{5}$$

де A – постійний коефіцієнт пропорційності;
 – α и β – показники ступеня.

Для визначення величини показника ступеня α використано дані пластин з однаковою дозою базової домішки $Q=15$ мкКл/см². У цьому разі величина α визначалася за виразом:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{x_{jm(2.1-2.3)}}{x_{jm(4.1-4.3)}}\right)}{\ln\left(\frac{D_{(2.1-2.3)}}{D_{(4.1-4.3)}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{1,490}{1,292}\right)}{\ln\left(\frac{2,9254 \cdot 10^{-9}}{2,1276 \cdot 10^{-9}}\right)} = \frac{0,1426}{0,3184} \approx 0,448 \tag{6}$$

Тоді показник ступеня β буде визначатися за використання даних поєднання різних доз базової домішки за виразом:

$$\beta = \frac{\ln\left\{\frac{\left[\frac{x_{jm1}}{(D_1)^{0,448}}\right]}{\left[\frac{x_{jm2}}{(D_2)^{0,448}}\right]}\right\}}{\ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)} \tag{7}$$

Дані розрахунку за виразом (7) наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку за виразом (7)

Q_1/Q_2	4/15	4/15	4/50	15/50	15/50
ρ_1/ρ_2	2,5/1,2	2,5/0,3	2,5/1,2	1,2/1,2	0,3/1,2
x_{jm1}/Dt_1	0,86913	0,86913	0,86913	0,99201	0,99232
x_{jm2}/Dt_2	0,99201	0,99232	1,11796	1,11796	1,11796
$\ln(Q_1/Q_2)$	-1,32175	-1,32175	-2,52573	-1,20397	-1,20397
β	0,10005	0,1003	0,09968	0,09947	0,09902
<i>Середнє значення $\beta_{cp}=0,0997$</i>					

Перетворивши вираз (5), одержують формулу розрахунку коефіцієнта пропорційності A :

$$A = \frac{x_{jm}}{(D)^{0,448} \cdot (Q)^{0,997}} \tag{8}$$

Дані розрахунку коефіцієнта A наведено в табл. 5.

Дані розрахунків показників ступеня (α та β) та коефіцієнта пропорційності A мало відрізняються, що дає змогу використовувати для розрахунків середню величину. У результаті розрахункова глибина для оцінки максимальної концентрації домішки бору в базі дрейфового біполярного n-p-n-транзистора буде визначатися за простою формулою:

Таблиця 5

Значення коефіцієнта А

Q , мкКл/см ²	4	15	50	15
ρ , Ом·см	2,5	1,2	1,2	0,3
x_{jm} , $\times 10^{-4}$, см	1,999	1,490	1,596	1,292
$(Dt)^{0,448}$	0,000230	0,0001502	0,0001428	0,000132
$(Q)^{0,997}$	1,1482	1,30995	1,4770	1,30995
A	0,7569	0,7573	0,7567	0,7563
Середнє значення $A=0,7568 \approx 0,757$				

$$x_{jm} = 0,757 \cdot (D)^{0,448} \cdot (Q)^{0,997} \tag{9}$$

Порівняння величин глибини x_{jm} , які були отримані в ході експериментів (табл. 3), з даними, які розраховані за формулою (9) (табл. 6), показують низький відсоток розбіжності ($\pm \Delta$, %), який знаходиться в межах похибки експерименту. Зведені показники експериментальних та теоретичних даних наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Зведені показники експериментальних та теоретичних даних

Q , мкКл/см ²	4	15	50	15
ρ , Ом·см	2,5	1,2	1,2	0,3
x_{jm} , $\times 10^{-4}$, [табл.3]	1,999	1,490	1,596	1,292
x_{jm} , $\times 10^{-4}$, [формула (9)]	1,999	1,489	1,597	1,291
$\pm \Delta$, %	0	0,07	0,06	0,08

Дані табл. 6 дають змогу використовувати формулу (9) для розрахунку максимальної концентрації бору в реальному розподілі домішки в базі дрейфового транзистора n-p-n за виразом:

$$N_{a,max} = N_{a,a} \cdot \exp\left(-\frac{x_{jm}^2}{4D}\right) \tag{10}$$

Висновки

Масштабне виробництво широкого класу електронної апаратури систем управління на базі інтегральних схем потребує удосконалення технологічних карт із метою скорочення кількості операцій за збереження якості продукції. Тому було застосовано моделювання процесу легування домішками структури дрейфового n-p-n-переходу для отримання оптимальних електричних параметрів та базових характеристик за спрощеної моделі розрахунку. У підсумку отримано такі результати.

1. Однозначно визначено максимальну концентрацію ($N_{a,max}$) домішки бору в реальному розподілі домішки на основі дрейфового n-p-n-транзистора за виразом оцінки глибини x_{jm} .
2. Установлено, що величина $N_{a,max}$ дає змогу оцінити очікуване значення величини напруги пробною емітерного p-n-переходу $U_{e\delta o}$ за оперативного розрахунку конструкції та технології дрейфових n-p-n-транзисторів.
3. Найбільш оптимальне поєднання електричних параметрів і характеристик буде у дрейфових n-p-n-транзисторів, у яких глибина емітерного p-n-переходу збігається з глибиною максимальної концентрації базової домішки.

Список використаної літератури

1. Baliga V.J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. New York: Springer, 2008. 1085 p.
2. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка : у 3-х ч. *Елементи мікросхемотехніки* : навчальний посібник. Київ : Вища школа, 2006. Ч. 2. 503 с.
3. Lei, L., Shi, J.-M., Xu, X.-Q., Yang, J.-Q., et al. Current Gain Degradation Model of Displacement Damage for Drift BJTs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2019. P. 716–723.
4. 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.
5. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів : монографія. Херсон : ФОП Вишемирський В.С., 2018. 184 с.
6. Sajad A. L., Faisal B., M. Saqib A., Abdulrahman M. A. Design and Simulation of Oxide and Doping Engineered Lateral Bipolar Junction Transistors for High Power Applications. URL: <https://www.bohrium.com/paper-details/design-and-simulation-of-oxide-and-doping-engineered-lateral-bipolar-junction-transistors-for-high-power-applications/814583236318461954-601> (дата звернення: 23.05.2025).
7. Sze S.M. *Semiconductor Devices, physics and technology*: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd, 2002. 574 p.
8. Оперативний розрахунок елементів мікросхем та напівпровідникових приладів : монографія / П.Є. Михаліченко та ін. ; за ред. П.Є. Михаліченко. Миколаїв : Іліон, 2024. 188 с.
9. Фролов О.М., Марончук І.Є., Курак В.В. Спосіб виготовлення високочастотних біполярних n-p-n-транзисторів : деклар. пат. № 33442 А Україна, МПК НО1L 7/34. Опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1. Data 15.02.2001.

References

1. Baliga, V.J. (2008). *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. New York: Springer [in English].
2. Pryshchepa, M.M., & Pohrebniak, V.P. (2006) *Mikroelektronika* [Microelectronics]: in 3 p. P. 2. *Elementy mikroskhemotekhniky* [Elements of microskhemotekhniky]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
3. Lei, L., Shi, J.-M., Xu, X.-Q., & Yang, J.-Q. (2019) Current Gain Degradation Model of Displacement Damage for Drift BJTs. *IEEE Transactions on Nuclear Science* [in English].
4. Kuzmychiev, A.I., Pysarenko, L.D., & Tsybulskyi, L.Iu. (2019). *Tekhnologichni osnovy elektroniky* [Technological foundations of electronics]. book.1. *Tekhnolohiia vyrobnytstva mikroskhem* [Chip manufacturing technology]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].
5. Lytvynenko, V.M. (2018). *Fyzyka ta tekhnolohiia napivprovidnykovykh diodiv* [Physics and technology of semiconductor diodes]. Kherson: FOP Vyshemyrskyi V.S. [in Ukrainian].
6. Sajad, A. L., Faisal, B., M. Saqib, A., & Abdulrahman, M. A. Design and Simulation of Oxide and Doping Engineered Lateral Bipolar Junction Transistors for High Power Applications. (2025). Retrieved from <https://www.bohrium.com/paper-details/design-and-simulation-of-oxide-and-doping-engineered-lateral-bipolar-junction-transistors-for-high-power-applications/814583236318461954-601> [in English].
7. Sze, S.M. (2002). *Semiconductor Devices, physics and technology*: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd. [in English].
8. Mykhalichenko, P.Ie., Frolov, O.V., & Nadtochyi, A.V. (2024). *Optyimizatsiia tekhnolohii vyhotovlennia epitaksialno-planarnoho varykapa* [Operational calculation of microcircuit elements and semiconductor devices]. Mykolaiv: Ilion [in Ukrainian].
9. Frolov, O.M., Maronchuk, I.Ye., & Kurak, V.V. *Sposib vygotovlennja vysokochastotnykh bipoljarnykh n-p-n tranzystoriv* [Method of manufacturing high-frequency bipolar n-p-n transistors]. Deklar. pat. No 33442 A Ukrajina. HOIL 7/34, opubl. Bulletin no1. Data 15.02.2001 [in Ukrainian].

Фролов Олександр Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматичної та електроустаткування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. E-mail: iskanderfrolov52@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2186-9488.

Селіверстова Світлана Ростиславівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматичної Херсонської державної морської академії. E-mail: ussr28031972@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1015-1593.

Frolov Alex Mykolaiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation and Electrical Equipment of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov. E-mail: iskanderfrolov52@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2186-9488.

Seliverstova Svitlana Rostyslavivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation Systems of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: ussr28031972@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1015-1593.

Дата надходження статті: 24.10.2025

Дата прийняття статті: 04.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

