

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКООМНОГО КРЕМНІЮ РІЗНИХ МОДИФІКАЦІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ФОТОДІОДІВ

Представлені розрахункові та експериментальні вольтамперні та ємнісні характеристики фотодіодів на основі високоомного кремнію.

The calculated and experimental results are presented by the volt-ampere and capacity characteristics of the photodiodes on the base of the high specific resistant silicon.

Сучасне оптоелектронне виробництво зумовлює застосування фотодіодів на основі кремнію різного призначення. Як відомо [1], фотоелектричні параметри фотодіодів знаходяться у залежності один від одного. Наприклад, прагнення до малих темнових струмів призводить до зростання ємності. Зменшення інерційності найпростіше досягається шляхом збільшення робочої напруги. Наслідком цього є підвищення темнового струму та погіршення порогових характеристик.

У залежності від вимог до фотоелектричних параметрів фотодіоди виготовляються на основі матеріалів з різним питомим опором. У даній роботі досліджується залежність темнового струму I_t та ємності C від питомого опору ρ кремнію, який традиційно використовується при розробці фотодіодів, оптимізованих для реєстрації оптичного випромінювання у спектральному діапазоні $\lambda=0,4\div 1,1$ мкм.

Проведено розрахункові й експериментальні дослідження високоомного кремнію різних марок, оскільки саме такий кремній використовується при розробці малоінерційних, порогових фотодіодів з малою ємністю.

Визначались теоретична залежність питомих значень темнового струму від зміщення для ідеального $p-n$ переходу, тобто без урахування впливу високотемпературних обробок вихідного матеріалу - $I_t = f(U_c)$, та ця ж величина після термічних процесів - $I_{tT} = f(U_c)$. Також визначалась залежність ємності від величини зміщення на $p-n$ переході $C = f(U_c)$.

Зазначені залежності отримано для таких марок високоомного кремнію:

БДМ-И1(*), $\rho \approx 4 \cdot 10^4$ Ом·см (крива 1);

БДМ-И1В(*), $\rho \approx 10^4$ Ом·см (крива 2);

КБО-2(**), $\rho \approx 6 \cdot 10^3$ Ом·см (крива 3);

КБО-1(*), $\rho \approx 1,3 \cdot 10^3$ Ом·см (крива 4);

КБО-20(**), $\rho \approx 3 \cdot 10^3$ Ом·см (крива 5);

Е4БКДБ/30(*), $\rho \approx 4 \cdot 10^3$ Ом·см (крива 6);

Б-12(*), $\rho \approx 4 \cdot 10^2$ Ом·см (крива 7).

(*) ТУ 48-4-363-88 (кремній монокристалічний для фотоприймачів), (**) ТУ 48-4-504-88 (кремній монокристалічний особливо чистий).

Разом з марками наведені позначення матеріалів на рис.1-4.

Час життя вихідного матеріалу визначався за технічними умовами на кожен марку кремнію. Вважалося, що визначальною складовою темнового струму є генераційна складова I_g , оскільки всі фотодіоди згаданого призначення працюють у режимі наявності зовнішнього зміщення на $p-n$ переході і область збору неосновних носіїв струму (ННС) для них – збідена область. Дифузійна складова темнового струму за таких умов практично на 1–2 порядки менша за генераційну. Тому нею можна знехтувати. Генераційний струм визначався за формулою:

$$I_g = qn_i W_i / \tau, \quad (1)$$

де q - заряд електрона, n_i - власна концентрація носіїв струму, W_i - ширина збіденої зони в області власної провідності, τ - час життя ННС.

Розрахунок реального значення темнового струму I_{gT} на готових фотодіодах проводився виходячи з того, що час життя ННС зменшується внаслідок термічних обробок. Величина такого зменшення визначалась із таких міркувань.

Залежність темнового струму від температури задається виразом [1]:

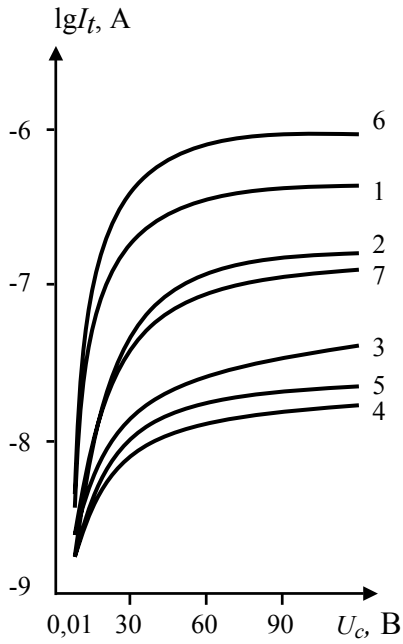


Рис.1. Теоретична вольтамперна залежність ідеальних $p-n$ переходів без урахування зменшення часу життя ННС в наслідок термічних процесів. 1-7 - номери марок кремнію.

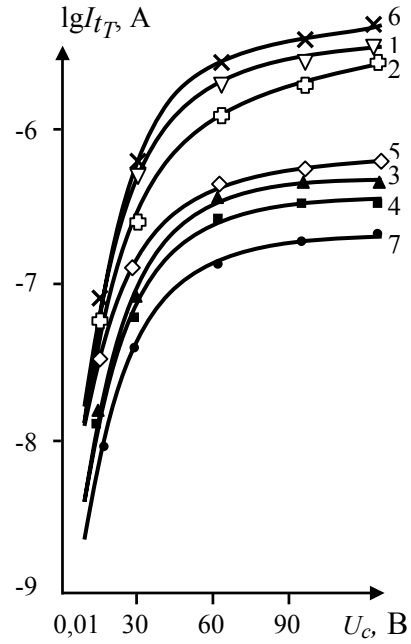


Рис.3. Експериментальна вольтамперна залежність $p-n$ переходів з урахування зменшення часу життя ННС в наслідок термічних процесів. 1-7 - номери марок кремнію.

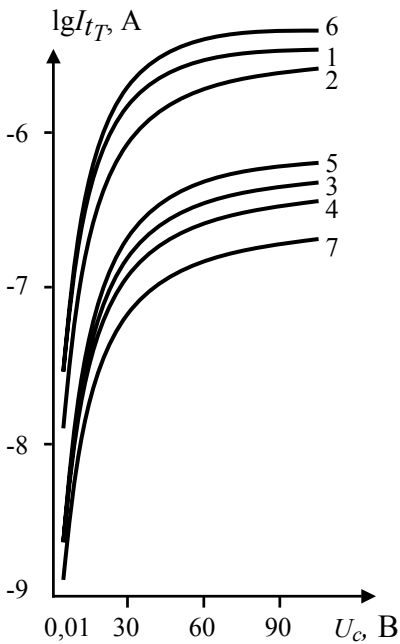


Рис.2. Теоретична вольтамперна залежність ідеальних $p-n$ переходів з урахування зменшення часу життя ННС в наслідок термічних процесів. 1-7 - номери марок кремнію.

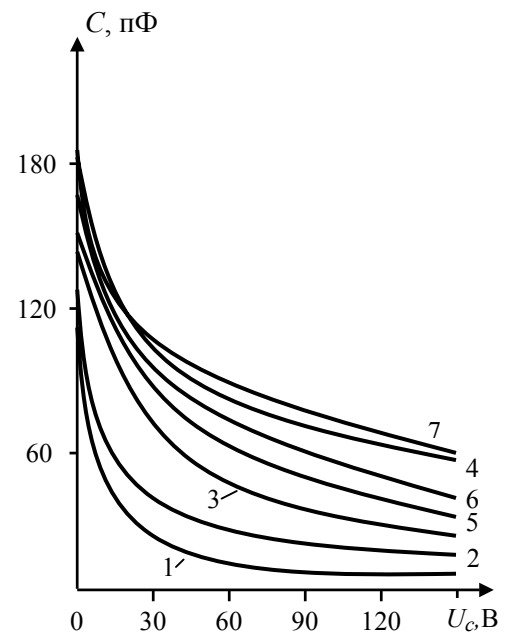


Рис.4. Теоретичні та реальні залежності ємності від напруги на $p-n$ переході. 1-7 - номери марок кремнію. Теоретичні та реальні характеристики збігаються.

$$I_t \cong q \cdot \sqrt{D/\tau} \cdot n_i^2 / N \sim T \cdot \exp(-E_g / kT), \quad (2)$$

де D - дифузійна довжина ННС, N - концентрація домішок, T - температура, E_g - ширина забороненої зони кремнію, k - постійна Больцмана. Від так, час життя ННС, який входить у вираз (2), можливо приблизно оцінити як:

$$\tau^{1/2} = \frac{q n_i^2 D^{1/2}}{NT \exp(-E_g / kT)}. \quad (3)$$

Ширина збідненої області W фотодіода визначалась за формулою [1]:

$$W = [2 \varepsilon \varepsilon_0 \rho \mu (U_p + U_k)]^{1/2}, \quad (4)$$

де ε , ε_0 - діелектрична проникливість кремнію та вакууму відповідно, ρ - питомий опір матеріалу, μ - рухливість ННС, U_p - робочий опір на p - n переході, U_k - контактна різниця потенціалів на p - n переході. Ємність фотодіодів визначалась за формулою [1]:

$$C = (\varepsilon \varepsilon_0 S) / W,$$

де S - площа p - n переходу (у нашому випадку 1 см^2).

Розраховувались питомі величини параметрів, приведені до одиниці площі.

Як видно з рис.1-3, розраховані та виміряні значення I_{tT} збігаються з досить високою точністю.

На рис.4 представлені теоретичні та реально виміряні залежності ємності від величини зміщення на p - n переході $C = f(U_c)$, які практично збігаються.

На основі отриманих результатів розроблені алгоритми та створені програми, які спрощують розрахунки ємності та темнових струмів фотодіодів, що виготовляються на основі високоомного кремнію різних марок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. - М.: Мир, 1984. Т.1.