

АЩЕУЛОВ А.А. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Ю.Г.,  
ГОДОВАНЮК В.М.

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ ЕПІТАКСІЙНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ФОТОДІОДІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

В роботі показані результати досліджень радіаційної стійкості фотодіодів на основі високоомних епітаксійних структур n-n<sup>+</sup> типу. Надані рекомендації по оптимізації параметрів епітаксійних структур та конструктивних особливостях фотодіодів. При цьому враховані реальні зміни параметрів після впливу нейтронного випромінювання - флюенса нейтронів, як одного з головних чинників, що впливають на деградацію коефіцієнта збирання фотогенерованих носіїв струму.

В даній роботі виявлені раніше невідомі особливості кремнієвих епітаксійних структур n-n<sup>+</sup> типу, які впливають на стійкість фотодіодів до дії потоків нейтронного випромінювання, зокрема, на коефіцієнт збирання неосновних носіїв заряду. З врахуванням отриманих результатів розроблена і досліджена конструкція фотодіода, що забезпечує мінімальну зміну монохроматичної чутливості струму від потоку нейтронів до 10<sup>13</sup> н/см<sup>2</sup>.

Одним з основних показників, які визначають радіаційну стійкість фотодіода є величина зміни фоточутливості після дії радіації. Ефект дії нейтронів на час життя неосновних носіїв заряду як фактора радіаційної дії, в кілька разів вище, ніж гама-квантів. Велика концентрація введених при нейтронному опроміненні дефектів приводить до зростання питомого опору кремнію. Коефіцієнт збирання носіїв заряду, які генеруються в р-n-переході залежить від добутку [1]:

$$\alpha(L_p + L_{p-n} + L_n), \quad (1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання світла;  $L_p$ ,  $L_n$  - дифузійні довжини

носіїв;  $H_{p-n}$  - глибина залягання p-n переходу.

Для випромінювання з довжиною хвилі 0,6-0,9 мкм оптимальна товщина області збирання носіїв визначається глибиною поглинання світла, яка в даному випадку складає кілька десятків мікрон. Найкращим чином ці вимоги задовольняє високоомна епітаксійна структура товщиною кілька десятків мікрон, вирощена на основі низькоомної підложки з таким же типом провідності. Для забезпечення достатньої радіаційної стійкості фотодіодної структури, розрахунок конструкції необхідно проводити з врахуванням зміни параметрів матеріалу і елементів конструкції після дії радіаційних факторів [2].

Величина зміни монохроматичної чутливості струму після дії радіації розраховується, виходячи із зміни коефіцієнта збирання неосновних носіїв заряду

$$\frac{\Delta S_{I\lambda}}{S_{I\lambda}} = \frac{Q_{\lambda} - Q_{\lambda}^{\Phi}}{Q_{\lambda}}, \quad (2)$$

де:  $\Delta S_{I\lambda}$  - зміна монохроматичної чутливості струму фотодіода після дії інтегрального потоку нейтронів;  $S_{I\lambda}$  - монохроматична чутливість струму фотодіода до дії інтегрального потоку нейтронів;  $Q_{\lambda}$ ,  $Q_{\lambda}^{\Phi}$  - коефіцієнт збирання неосновних носіїв заряду відповідно до і після дії інтегрального потоку нейтронів.

Очевидно, що швидкість поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду змінюється після дії радіаційних факторів, відповідно змінюється і коефіцієнт збирання неосновних носіїв заряду. Якщо прийняте випромінювання поглинається в основному не в приповерхневій області (базі), а в об'ємі напівпровідникової підкладки, то коефіцієнт збирання неосновних носіїв заряду до дії радіаційних факторів визначається як сума коефіцієнтів збирання в базі і об'ємі кристалу фотодіоду, а після дії радіаційних факторів - тільки його об'ємною складовою. В цьому випадку величини коефіцієнтів можна визначити за формулами:

$$Q_{\lambda} = 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} + \alpha H_{p-n}, \quad (3)$$

$$Q_{\lambda}^{\Phi} = 1 - \frac{e^{-\alpha W \Phi}}{1 + \alpha L_p^{\Phi}} + \alpha N_{p-n}, \quad (4)$$

де:  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання випромінювання на робочій довжині хвилі;  $L_p, L_n$  - дифузійні довжини носіїв;  $W, W^{\Phi}$  - ширина області просторового заряду відповідно до і після дії радіаційних факторів;  $N_{p-n}$  - ширина бази (глибина залягання р-n переходу);  $L_p, L_p^{\Phi}$  - дифузійні довжини неосновних носіїв заряду відповідно до і після дії радіаційних факторів.

При достатньо великих потоках нейтронів (флюенс  $\sim 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>) питомий опір матеріалу може збільшуватись, і, як наслідок, зростає ширина області просторового заряду [3]. Проте результати, отримані при випробовуванні досліджуваних зразків фотодіодів, не підтвердили це положення.

Було виготовлено кілька видів фотодіодів на основі кремнієвих епітаксійних структур товщиною 40 мкм і глибиною р-n переходу біля 2 мкм. Для фотодіодів, що працюють в фотогальванічному режимі (без прикладання до бази зовнішнього зміщення), з конструктивними параметрами, приведеними вище, після дії потоку нейтронів з флюенсом випромінювання  $10^{13}$  н/см<sup>2</sup>, ширина області просторового заряду повинна забезпечити ефективне збирання фотогенерованих носіїв в об'ємі епітаксійного шару з мінімальною деградацією монохроматичної чутливості струму. Проте дані випробувань показали відхід чутливості до 90%.

Отриманий результат дозволив зробити висновок про те, що після дії радіаційних факторів дифузійна довжина неосновних носіїв заряду і ширина області просторового заряду змінюються. Дифузійна довжина зменшується, а ширина області просторового заряду у фотодіодів, що працюють в фотогальванічному режимі, на відміну від фотодіодного режиму (в умовах прикладення до бази фотодіоду зовнішньої робочої напруги), або не змінюється, або зменшується.

Таким чином, при розробці радіаційно стійких фотодіодів на основі епітаксійних структур, що працюють як в фотодіодному, так і в фотогальванічному режимах, необхідно вибирати товщину епітаксійного шару співрозмірною з глибиною проникнення

випромінювання і з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду і шириною області просторового заряду в епітаксійному шарі після дії радіаційних факторів. Крім того, як показують результати наших досліджень, глибина залягання р-п переходу також повинна бути співрозмірною і з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду і шириною області просторового заряду в базі фотодіода після дії радіаційних дефектів.

На основі викладеного і досвіду авторів реалізовано принцип конструювання радіаційно стійких фотодіодів на основі кремнієвих епітаксійних структур шляхом оптимізації і систематизації таких параметрів, як товщина епітаксійного шару, глибина залягання р-п переходу (базової області), дифузійна довжина неосновних носіїв заряду в дискретній області і в епітаксійному шарі після дії нейтронного опромінення і в підкладці до його дії. Крім того, ширина області просторового заряду в епітаксійному шарі до і після нейтронної дії і ширина області просторового заряду в дискретній області після дії нейтронного опромінення.

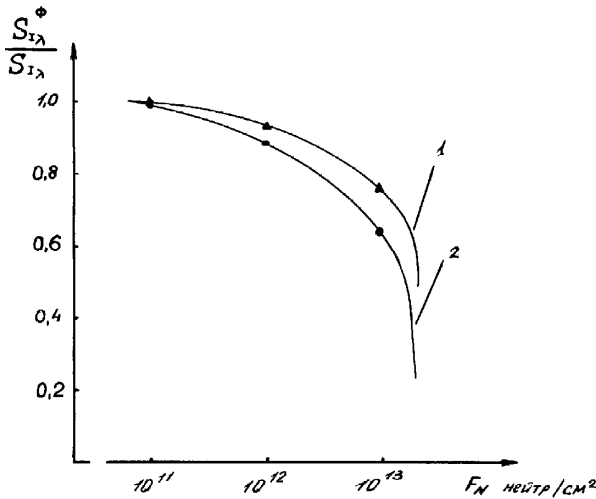


Рис.1. Залежність відносної зміни монохроматичної чутливості струму від потоку нейтронів розробленого фотодіода (1) і фотодіода, що випускається серійно (2).

Випробовування фотодіодів, які виготовлялись з врахуванням описаних вимог, показали мінімальне погіршення чутливості після дії потоку нейтронів до  $10^{13}$  н/см<sup>2</sup> в порівнянні з фотодіодами, що випускаються серійно (рис.1). Отримані результати використані при конструюванні і серійному виробництві фотодіодів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайтов Ф.А., Литвинова Н.Н., Савицкий В.Г. Радиационная стойкость в оптоэлектронике.-М.: Воениздат, 1987. 93с.
2. Ascheulov A.A., Dobrovolskiy U.G., Godovanjuk V.N. Optimization of Epitaxial Structures Parameters for Radiational Stability of Photodiodes, on Their Base// Abstr. Second International School-Conference on PPMSS 8th-12th of September 1997.-Chernivtsi.-1997.- С.317.
3. Зайтов Ф.А., Бахар Л.И., Ильченко Л.И. Действие гамма-нейтронного облучения на высокоомный особочистый кремний // Известия АН Уз.ССР.-1981.-**37**,№ 1.- С.28-31.

## SUMMARY

ASCHEULOV A.A., DOBROVOLSKIY U.G.,  
GODOVANJUK V.N.,

### **OPTIMIZATION OF EPITAXIAL STRUCTURES PARAMETERS FOR RADIATIONAL STABILITY OF PHOTODIODES ON THEIR BASE**

The research of radiational-stable photodiodes based on high-resistance epitaxial n-n<sup>+</sup>-type structures are presented in paper. The recommendations for optimization of epitaxial structures parameters and photo diodes design features are given. The real changes of parameters after influence neutron irradiation taking into account - neutron fluence, among main factors, influencing on degradation collection coefficient of photo generated current carriers.