

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 621.315.592

ОСОБЛИВОСТІ ДІЇ НИЗЬКОДОЗНОГО ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТАБІЛЬНІСТЬ КРЕМНІЄВИХ ДІОДНИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

Б. В. Павлик, І. В. Гарাপин, В. М. Злупко

Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра електроніки,
вул. Тарнавського, 107, м. Львів, 79017, тел.: (032) 2964371, факс: (032)2964730
e-mail: pavlyk@electronics.wups.lviv.ua, garapyn@electronics.wups.lviv.ua

Анотація

ОСОБЛИВОСТІ ДІЇ НИЗЬКОДОЗНОГО ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТАБІЛЬНІСТЬ КРЕМНІЄВИХ ДІОДНИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

Б. В. Павлик, І. В. Гарাপин, В. М. Злупко

Встановлено закономірності дії іонізуючого високоенергетичного гама-опромінення (Co^{60}) на стабільність параметрів температурних сенсорів, виготовлених на базі р-п переходів кремнієвих транзисторів із низьколегованою базою. Опромінення датчиків здійснювали при кімнатній температурі γ -квантами (Co^{60} , потужність дози випромінювання 0,5 Гр/с) дозами 10...10⁴ Гр. Одержані експериментальні дані свідчать, що при γ -опроміненні дозами $\leq 5 \cdot 10^2$ Гр температурна характеристика сенсора стабілізується в часі і не зміщується при повторному опроміненні. Зроблено висновок, що мінімальні радіаційні зміни спостерігаються в р-п структурах з тонкою базою, що свідчить про радіаційну стійкість досліджуваних сенсорів.

Ключові слова: температурний сенсор, р-п перехід, радіаційна стійкість

Abstract

THE PECULIARITIES OF LOW-DOSE IONIZING IRRADIATION EFFECT ON THE STABILITY OF TEMPERATURE SENSORS ON THE SILICON DIODE BASIS

B. V. Pavlyk, I. V. Garapyn, V. M. Zlupko

The behaviour of high-dose ionizing γ -irradiation (Co^{60}) effect on the parameter stability of the temperature sensors which are produced on the basis of lightly doped base silicon p-n junction has been determined. The radiation treatment was performed under γ -rays (Co^{60} , dose rate 0,5 Gy/s) at room temperature at the dosage level from 10 to 10⁴ Gy. The obtained experimental data give evidence that the temperature characteristic of sensor is stabilized upon γ -irradiation with doses up to 5 · 10² Gy and doesn't shift at repeat irradiation. The minimal radiation-induced change is found to be in the p-n junction with a thin base thus evidencing about radiation stability of sensors under study.

Key words: temperature sensors, p-n junction, radiation stability

Аннотация

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОДОЗНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДНЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Б. В. Павлык, И. В. Гарапин, В. Н. Злупко

Установлены закономерности воздействия ионизирующего высокоэнергетического гамма-излучения (Co^{60}) на стабильность параметров температурных сенсоров, изготовленных на основе р-п переходов кремниевых транзисторов с низколегированной базой. Облучение датчиков осуществляли при комнатной температуре (Co^{60} , мощность дозы излучения 0,5 Гр/с) дозами $10 \dots 10^4$ Гр. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что при γ -облучении дозами $\leq 5 \cdot 10^2$ Гр температурная характеристика сенсоров стабилизируется по времени и не сдвигается при повторном облучении. Сделан вывод, что минимальные радиационные изменения наблюдаются в р-п структурах с тонкой базой, что свидетельствует о радиационной стойкости исследуемых сенсоров.

Ключевые слова: температурный сенсор, р-п переход, радиационная стойкость

Розробка і використання напівпровідникових сенсорів фізичних величин, здатних працювати в екстремальних умовах, є своєчасним і актуальним завданням. Особливу увагу дослідників привертають сенсори температури, параметри яких стабільні в полях дії радіації. Якщо процеси радіаційно-стимульованого дефектоутворення та деградації властивостей матеріалів при великих дозах опромінення вивчені достатньо широко [1, 2], то ефекти, які проявляються в окремих пристроях напівпровідникової електроніки при малих дозах опромінення [3, 4], вимагають дальших досліджень.

У сучасній термометрії все ширшого використання набувають кремнієві р-п- переходи з низколегованою [5] та високолегованою [2, 6] базою. Залежно від схеми включення р-п- переходу, інформативним параметром температури може бути струм насичення (I_0) при зворотному вмиканні або падіння напруги (U) при прямому вмиканні. Кремнієві транзисторні сенсори температури, створені на базі прямої вітки характеристики р-п переходу (база-емітер), володіють високою чутливістю і точністю вимірювання, стабільністю характеристик в діапазоні температур від -20 до $+150^\circ\text{C}$. Дія зовнішніх факторів на такі термосенсори вивчена далеко не повністю.

Метою даної роботи було встановлення закономірності дії іонізуючого високо енергетичного гамма випромінювання (Co^{60}) на стабільність параметрів температурних сенсорів, виготовлених на базі р-п переходів кремнієвих

транзисторів із низколегованою базою. Отримані результати дозволять покращити експлуатаційні параметри термометрів та сприятимуть розширенню області їх використання.

Об'єкти дослідження та критерії їх вибору

Нами досліджувались датчики портативних термометрів ТП-2Н [6], розроблені на основі безкорпусних транзисторів КТ-354-2. Дані термометри призначені для вимірювання температури в різних середовищах від -20 до $+150^\circ\text{C}$ (межа допустимого значення основної похибки від $\pm 0,1$ до $\pm 0,5^\circ$). За стабільністю характеристик дані термометри не поступаються традиційним платиновим термоперетворювачам опору, але є на порядок дешевшими.

При розробці критеріїв придатності для використання кремнієвих термосенсорів на базі р-п переходів в умовах дії іонізуючого випромінювання ми виходили з аналізу відомого рівняння Шоклі:

$$I_{np} = I_S \left(e^{U_{np}/\phi_T} - 1 \right) + I_R \left(e^{U_{np}/2\phi_T} - 1 \right), \quad (1)$$

де I_{np} — повний струм через р-п перехід;

I_S — струм насичення;

I_R — рекомбінаційний струм;

ϕ_T — тепловий потенціал (кТ/q),

k — стала Больцмана;

T — абсолютна температура в К;

q — заряд електрона.

За умови, що $|U_{np}| \gg I_{np} \cdot r_0$; $U_{np} \ll \phi_T$; $T = T_0$ отримаємо значення:

$$I_{So} = \frac{|q| D S P_{no}}{L \cdot th\left(\frac{W}{L}\right)}; I_{Ro} = \frac{|q| \varphi_T P_{no} D W}{(\Delta\varphi_0 - U_{np}) L^2}, \quad (2)$$

де P_{no} – рівноважна концентрація неосновних носіїв заряду;

$\Delta\varphi_0$ – потенціальний бар'єр р-п переходу;

L – дифузійна довжина пробігу носіїв заряду;

W – геометрична ширина бази;

S – площа р-п переходу;

D – коефіцієнт дифузії.

З аналізу виразів(1), (2) випливає, що основною радіаційно-чутливою величиною є дифузійна довжина пробігу носіїв заряду, яка в свою чергу визначається вихідними властивостями даного матеріалу і змінюється під дією зовнішнього впливу (зокрема, опромінення):

$$L = \sqrt{D \tau_{ef}}; \text{ де } \tau_{ef} = \frac{\tau_v \cdot \tau_s}{\tau_v + \tau_s}, \tau_v - \text{ постійна}$$

часу об'ємної рекомбінації; τ_s – постійна часу поверхневої рекомбінації. Постійна часу τ_v залежить від структурної досконалості кристалічної ґратки (концентрації та типу дефектів, в т.ч. і радіаційних).

Відомо також, що час життя неосновних носіїв заряду залежить від величини поглинутої дози: $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k\Phi$, де k – коефіцієнт,

який визначається швидкістю введення рекомбінаційних центрів, їх перерізом захоплення та рівнем заповнення (для n-Si – $k = (4.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-7} \left(\frac{cN_v}{cm^2}\right)^{-1}$), Φ – величина поглинутої дози.

Хоча опромінення генерує у забороненій зоні низку енергетичних рівнів, проте час життя визначається тільки одним-двома домінуючими рівнями. Виходячи з цих міркувань, для зменшення залежності τ_v від дії зовнішніх факторів та усунення їх впливу на стабільність характеристик необхідно, щоб для р-п переходів виконувалась умова: $L \gg W$ (тобто повинна бути тонка база). Наявність низького ступеня легування бази і її мала товщина зводять до мінімуму вплив релаксаційних процесів на величини I_{So} та I_{Ro} . Даним вимогам задовольняє емітерний перехід надвисокочастотного транзистора з високим значенням коефіцієнта передачі струму бази, в якого колектор закорочений на базу.

Отримані результати та їхній аналіз

Об'єктом дослідження були термосенсори на основі високочастотного кремнієвого р-п переходу з низьколегованою базою. Робочий струм сенсора – $1 \cdot 10^{-4}$ А, коефіцієнт стабілізації струму – $2 \cdot 10^{-4}$. Температура відтворювалась в реперній точці 0°C . Опромінення датчиків здійснювали при кімнатній температурі γ -квантами (Co^{60} , потужність дози випромінювання $0,5 \text{ Гр/с}$) дозами ($10 \dots 10^4 \text{ Гр}$). Вимірювання зсуву температурної характеристики в реперній точці проводили як після опромінення (I вимір), так і згодом, через 8 та 35 днів після витримки при кімнатній температурі (відповідно, II та III вимір). Сенсори №1-3 були повторно опромінені дозою 7 Гр. Результати вимірювань наведені в таблиці.

Одержані експериментальні дані свідчать, що при гамма- опроміненні дозами $\leq 5 \cdot 10^2 \text{ Гр}$ температурна характеристика стабілізується в часі і не зміщується при повторному опроміненні. Причому величина спаду напруги на р-п переході при температурі 0°C і значенні струму $1 \cdot 10^{-4}$ А зменшувалась порівняно з вихідним значенням (до опромінення). Враховуючи, що р-п перехід включений в прямому напрямку, а наявність низького ступеня легування бази і її мала товщина зводять до мінімуму вплив релаксаційних процесів на величини I_{So} та I_{Ro} (2), можна зробити висновок, що вимірюваний спад напруги під дією температури зумовлений властивостями області просторового заряду (ОПЗ). Тому проаналізуємо дію опромінення на U_{p-n} . Отже, $U_{p-n} = f(J_{np}, \tau_{p-n})$. Враховуючи, що у повному струмі через р-п перехід домінує складова, зумовлена рекомбінацією носіїв заряду в ОПЗ, можемо записати:

$$U_{p-n} = \frac{mkT}{q} \ln\left(\frac{J_{np} \tau_{pn}}{qn_i W}\right).$$

Оскільки $\tau = f(\Phi)$, то і $U_{p-n} = f(\Phi)$.

Зростання τ під дією опромінення на початковій стадії і його подальший вихід на насичення (стабілізація характеристик сенсора) ми інтерпретуємо наступним чином:

1. ОПЗ порівняно з об'ємом кристалу є завжди більш дефектною структурою.

2. Безпосередньо в процесі опромінення реальних кристалічних структур різко зростає коефіцієнт дифузії як носіїв заряду, так і дефектів кристалічної ґратки. При формуванні р-п структур на межі їх поділу утворюються метастабільні стани дефектів.

Таблиця

№ сенсора	Доза опромінення (Гр.)	Величина абсолютної похибки вимірювання температури, $\Delta T(^{\circ}\text{C})$			Доза повторно-го опромінення, (Гр.)	Величина абсолютної похибки вимірювання температури, $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	
		I вимір	II вимір (через 200 год. після I виміру)	III вимір (через 850 год. після II виміру)		IV вимір	V вимір (через 850 год. після IV виміру)
1	$1,5 \cdot 10^1$	-0,1	-0,1	0,0	7,0	+0,0	0,0
2	$5,0 \cdot 10^1$	+0,2	+0,2	+0,1	7,0	+0,1	+0,1
3	$5,0 \cdot 10^2$	+0,1	+0,1	+0,1	7,0	+0,1	+0,1
4	$1,0 \cdot 10^3$	+0,5	+0,2	+0,2	-	+0,1	+0,1
5	$5,0 \cdot 10^3$	+0,3	+0,2	+0,1	-	+0,1	+0,1
6	$1,0 \cdot 10^4$	+0,2	+0,2	+0,2	-	+0,1	+0,2

3. При великих рівнях інжекції ($\Delta p_n \gg n_n$) повний струм через p-n перехід визначатиметься не рекомбінаційною, а дифузійною складовою і радіаційно-стимульована швидкість зміни

$$\frac{dU_{pn}}{d\Phi} / J_{np=const} = \frac{J_{np} W}{\sigma_0^2} \frac{d\sigma_0}{d\Phi}$$

буде великою на початковій стадії опромінення ($\Phi < 1 \cdot 10^3$ Гр). При збільшенні дози процеси генерації радіаційних дефектів домінують над рекомбінаційними процесами і ефективність перших є вищою.

4. При опроміненні характер зміни U_{p-n} та U_b в діодних структурах є протилежним (при $\Phi < \Phi_{кр}$), що пояснюється різними швидкостями радіаційних змін k та $\frac{d\sigma}{d\Phi}$.

Висновки

1. Мінімальні радіаційні зміни спостерігаються в p-n структурах з тонкою базою, що свідчить про радіаційну стійкість досліджуваних сенсорів. Підтвердженням цього є досить велике (10^3 Гр) значення $\Phi_{кр}$ і малі значення зміни абсолютної похибки вимірювання температури.

2. У процесі опромінення ($\Phi < \Phi_{кр}$) в сенсорі температури відбувається одночасно декілька процесів, частина з яких є конкуруючими. Тому ми вважаємо, що на початковій стадії опромінення домінують процеси, пов'язані з переходом дефектів структури із метастабільного у стабільний стан, що аналогічне до факту покращення структурної досконалості, а значить і стабілізації температурних характеристик сенсора.

3. З врахуванням ефекту впорядкування дефектної структури, вираз для дозової залежності

зміни часу життя носіїв заряду на початковій стадії опромінення ($\Phi < \Phi_{кр}$) можна записати так:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \kappa \Phi - A(\Phi, x_0),$$

де $A(\Phi, x_0)$ — функція, яка враховує структурну досконалість зразка (x_0), вид опромінення та його характеристики (Φ).

Ця робота виконана при фінансовій підтримці Міністерства освіти і науки України (№ ДР 0105U002236).

Література

1. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А., Радиационная физика полупроводников. — К.: Наукова думка, 1979. — 336 с.
2. Хіврич В.І., Ефекти компенсації у напівпровідниках та сенсори радіації на цій основі: Автореф. дис. докт. фіз. — мат. наук, 01.04.10. — Одеса., 2006. — 40 с.
3. Pavlyk B.V., Lyshak M.V., On the model of radiation-induced ordering of the defect structure in CdS crystals // Ukr. J. of Phys. — 2006. — Vol.51, №3. — P. 275-279.
4. Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Мищук О.Н., К модели эффекта радиационно-стимулированного упорядочения в полупроводниках $A^{III}B^V$ // Физ. и техн. полупр. — 1989. — Т.23, Вып.2. — С. 2007-2012.
5. Патент №23648А. МКИ G 01 K 7/02. Леновенко А.М., Василюк В.М., Капітан В.І., Електронний цифровий термометр. — Заявл. 29.11.96; Опубл. 02.06.1998. — 3 с.
6. Shwarts Yu.M., Borblik V.L., Kulish N.R. et al., Radiation-resistant silicon diode temperature sensors // Sensors and Actuators A., Physical. — 2002. — Vol.97-98. — P. 271-279.