

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РАДІАЦІЇ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОСЕНСОРІВ

Б. Павлик, А. Грипа, О. Кравець, Я. Шмигельський.

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

Досліджено вплив рентгенівського опромінення (X -променів) на електрофізичні характеристики термосенсорів на базі p - n -переходу транзистора КТЗ117А. Аналіз характеристик напівпровідникових сенсорів, а також їх зміни під дією X -випромінювання дозволяють стверджувати, що на початковій стадії опромінення домінують процеси радіаційно-стимульованого впорядкування – покращення характеристик сенсора. Також, здійснено спробу визначення радіаційно стимульованого коефіцієнту дифузії носія заряду, на базі отриманого значення здійснено моделювання впливу радіації при малих дозах опромінення.

Ключові слова: термосенсор, рентгенівське випромінювання, p - n -перехід, дифузія.

Вступ. Серед великої кількості сенсорів, особливе місце посідають датчики температури [1]. Вони працюють на різних фізичних принципах і виготовляються з різних матеріалів та дозволяють вимірювати температуру в найбільш важкодоступних місцях, навіть там де інші величини неможливо поміряти.

Найбільш перспективними в цьому напрямку на сьогоднішній день є напівпровідникові діоди та транзистори [2], мікросхеми та гібридні мікроелементи на їх основі [3]. Як правило, найчастіше для вимірювання температури використовують пряме падіння напруги на p - n -переході.

Суттєвою перевагою таких сенсорів є лінійність їх температурної характеристики, широкий діапазон робочих температур та достатньо велика швидкість термостабілізації. Стабільним є пряме падіння напруги на p - n -переході, так як опір p - n -переходу в прямому напрямку в $10^4 \dots 10^5$ разів менше, ніж у зворотному, а шунтуючий вплив поверхневих каналів є незначним.

Найчастіше в якості термоелектричного параметра використовують пряме падіння напруги на емітерному p - n -переході при фіксованому струмі через емітер. При цьому колекторний контакт закорочений з базовим, тобто транзистор працює в режимі транзисторного діода. Хоча при даному включенні транзистора його характеристики аналогічні діодним, але їх відтворюваність краща, оскільки вони в меншій мірі залежать від опору бази та рекомбінації неосновних носіїв в базі.

Зараз ведуться дослідження дії високих доз опромінення на матеріали сенсорів температури та інтегральних мікросхем. Зокрема, багато робіт присвячено дослідженню радіаційних дефектів в кремнії та структурах на його основі [4].

В праці [5] показано, що малі дози опромінення не змінюють об'ємних властивостей компонент гетеропереходів на основі кремнію, але зате суттєво впливають

на стан границі поділу: спостерігається підвищення рекомбінаційних властивостей границі. Фізичні процеси, пов'язані із поліпшенням характеристик кристалів та приладів під дією малих доз радіації вивчено не повністю, хоча у практичній технології виготовлення приладів напівпровідникової електроніки цей ефект уже використовується. Тому дослідження цієї теми є актуальним.

Відомо, що радіаційні та структурні дефекти в напівпровідникових кристалах змінюють їх основні характеристики та властивості. Так дія опромінення супроводжується [6]:

- генеруванням в кристалах дефектів Френкеля, які, взаємодіючи з рекомбінаційно-активними домішками, змінюють їхній зарядовий стан та переріз захоплення носіїв заряду;
- перехід рекомбінаційної домішки з вузла у міжвузля кристалічної ґратки у результаті взаємодії з міжвузловим атомом матриці;
- взаємодія міжвузлового центру рекомбінації з вакансією, створеною опроміненням, що супроводжується анігіляцією останніх.

У всіх роботах, де описується вплив радіації на $p-n$ структури відмічається вплив радіації на вище зазначені фактори, але як згадувалося раніше на сьогоднішній день опис цих явищ є мало дослідженими. Так всі побудовані моделі ніяк не враховують «ефект малих доз», а лише пояснюють вплив радіаційного дефектоутворення на електрофізичні характеристики та параметри пристроїв.

В даній роботі розглядається припущення, що окрім радіаційної зміни часу життя носіїв заряду та кількості первинних точкових дефектів, відбувається зміна коефіцієнта дифузії. Основний принцип зміни коефіцієнту дифузії ми розглядаємо за аналогією вже відомого явища зростання коефіцієнту дифузії вакансій у кристалічних твердих тілах.

Постановка експерименту. Для дослідження були використані височастотні транзистори КТ3117. Дослідження відбувалося на переході емітер-база при цьому контакт колекторного переходу закорочувався з базовим виводом.

Опромінення зразка X -променями (Mo, 50 кВ, 10 мА) відбувалося в активному режимі з напругою $U_{e-b} = 0,7$ В. Тривалість опромінення 2 год., що еквівалентне дозі в 520 Гр. Обчислення відбувалося за допомогою програмного забезпечення Matlab.

Експериментальні та літературні дані. Сумарний струм через $p-n$ -перехід визначається дифузійною I_d та рекомбінаційною I_r складовими [7]:

$$I = I_d + I_r. \quad (1)$$

При зворотному зміщенні $p-n$ -переходу домінуючою є дифузійна складова повного струму, яка в цьому випадку описується виразом [7]:

$$I_d = S_{p-n} \frac{eD_p p_n}{L_p} \exp\left(\frac{-\omega}{L_p}\right) \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (2)$$

де L_p - дифузійна довжина пробігу дірки, S_{p-n} - площа $p-n$ -переходу, e - елементарний заряд, D_p - коефіцієнт дифузії дірок, p_n - концентрація неосновних носіїв заряду в базовій області, ω - товщина бази.

В нашому випадку ми можемо знехтувати рекомбінаційною складовою, так як всі вимірювання виконуються при зворотному зміщенні, це також дає можливість

знехтувати експоненціальною частиною виразу (2). В результаті, вираз (2) ми можемо записати як

$$I_d = S_{p-n} \frac{eD_p p_n}{L_p} \exp\left(\frac{-\omega}{L_p}\right). \quad (3)$$

Для визначення коефіцієнта радіаційно стимульованої дифузії було здійснено вимірювання зворотного струму, неопроміненого транзистора, що дало можливість визначити p_n . Після опромінення транзистора в активному режимі, вимірювання повторили.

В праці [8] здійснено спробу аналітичного опису дозової залежності часу життя неосновних носіїв заряду (ННЗ). Наступний вираз справедливий для області середніх та високих доз опромінення:

$$\tau_p(\Phi) = \frac{\tau_p(0)}{1 + \tau_p(0)k_\tau\Phi}, \quad (4)$$

де $\tau_p(\Phi)$ – час життя неосновних носіїв заряду після поглиненої дози Φ ; $\tau_p(0)$ – час життя ННЗ без опромінення; k_τ – сталий коефіцієнт, що є характеристикою матеріалу і визначає сприйнятливості до певного типу опромінення (для нашого зразка він рівний $3,6 \cdot 10^{-7}$ см²/квант·с).

Згідно з працею [9] час життя ННЗ в кремнії становить 3,8 мкс. Також в праці [6] показано, що залежність зміни концентрації рекомбінаційно-активних домішок від дози опромінення має вигляд:

$$p_n(\Phi) = p_n(0) \exp(-k_N\Phi), \quad (5)$$

де $p_n(\Phi)$ – концентрація ННЗ при поглиненій дозі Φ ; $p_n(0)$ – початкова концентрація ННЗ; була виміряна експериментальним чином і становить $5,87 \cdot 10^{19}$ м⁻³, k_N – як і у випадку з дозовою залежністю часу життя є характеристикою матеріалу і має величину $4 \cdot 10^{-7}$ см²/квант·с.

Для розрахунку коефіцієнту радіаційно стимульованої дифузії (РСД) було використано наступні додаткові дані: $S_{p-n}=10^{-9}$ м, $D_p=12,3 \cdot 10^{-4}$ м²/с, $L_p=6,89 \cdot 10^{-5}$ м², $\omega=17$ мкм.

Визначення коефіцієнта радіаційно-стимульованої дифузії

Надалі «зірочкою» позначаються електрофізичні параметри $p-n$ -переходу після поглиненої дози.

Для визначення D_p^* визначався зворотний струм I_s^* $p-n$ -переходу після опромінення транзистора рентгенівськими променями. Згідно з (3) маємо:

$$I_s^* = S_{p-n} \frac{eD_p^* p_n^*}{L_p^*} \exp\left(\frac{-\omega}{L_p^*}\right). \quad (6)$$

Для дифузійної довжини пробігу L_p^* маємо залежність [7]:

$$L_p^* = \sqrt{D_p^* \tau_p^*}. \quad (7)$$

Тоді:

$$I_s^* = S_{p-n} \frac{e\sqrt{D_p^*} p_n^*}{\sqrt{\tau_p^*}} \exp\left(\frac{-\omega}{\sqrt{D_p^*} \sqrt{\tau_p^*}}\right). \quad (8)$$

Позначивши $x = \sqrt{D_p^*}$, $a = \frac{ep_n^*}{\sqrt{\tau_p^*}}$, $b = \frac{-\omega}{\sqrt{\tau_p^*}}$, запишемо рівняння (8) так:

$$I_s^* = a \cdot x \cdot \exp\left(\frac{b}{x}\right). \quad (9)$$

Це рівняння можна розв'язати аналітично, використовуючи W -функцію Ламберта [10]. Ця функція вивчалась ще Л. Ейлером у XVIII столітті, але не мала самостійного значення і назви аж до кінця 80-х років XX століття. Як самостійна функція в практику математичних обчислень була введена розробниками системи комп'ютерної математики Maple. Загальноприйнятим позначенням для функції Ламберта є $W(x)$, або $LambertW(x)$. Дійсна функція Ламберта $W(x)$ для дійсного x визначається як розв'язок функціонального рівняння

$$W(x) \exp(W(x)) = x$$

На сьогоднішній день функція Ламберта включена у всі основні системи комп'ютерної математики (Maple, MatLab, MatCad, Mathematica).

Для розв'язання рівняння (9) нами був використаний вбудований в систему MatLab пакет символьних обчислень SymbolicMathToolbox. Точний аналітичний розв'язок рівняння (9) має вигляд:

$$x = -b/W(-ab/I_s^*). \quad (10)$$

Після підстановки числових значень в (7) і піднесення x до квадрату, отримуємо відповідні значення D_p^* .

$$\text{Для } I_s^* = 10^{-6} \text{ А} \quad D_p^* = 4,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$$

Побудова ВАХ р-п-переходу з врахуванням D_p^* . Проте, згідно з теоретичними та експериментальними даними, вираз (4) не дає можливість передбачити зміни електрофізичних параметрів за низьких доз опромінення, що зумовлює необхідність його корекції [8]:

$$\tau_p^*(\Phi) = \frac{\tau_p(0)}{1 + \tau_p(0)k_\tau \Phi - \tau_p(0)A(D_p^*, \tau_p(0))}, \quad (11)$$

де $A(D_p^*, \tau_p(0))$ - деяка функція дози опромінення та початкового стану системи, котра описує «ефект малих доз» та включає в себе коефіцієнт радіаційно стимульованої дифузії носія заряду.

Емпірично встановлено функцію $A(D_p^*, \tau_p(0))$, яка має вигляд:

$$A(D_p^*, \tau_p(0)) = k_x D_p^* \frac{\Phi_0^2}{\Phi}, \quad (12)$$

де k_x – деяка стала, що характеризує механізм взаємодії радіації з речовиною, D_p^* – коефіцієнт радіаційно стимульованої дифузії дірки, Φ_0 – доза опромінення, при якій генерація починає переважати над рекомбінацією дефектів, викликаних опроміненням.

Рекомбінаційна складова повного струму через $p-n$ -перехід [7]:

$$I_r = S_{p-n} \frac{e\omega n_i}{\tau_p^*} \frac{kT}{e(\phi_k - U)} \left(\exp\left(\frac{eU}{2kT}\right) - 1 \right) \quad (13)$$

де: ω - товщина базової області, ϕ_k - контактна різниця потенціалів робочого $p-n$ -переходу; n_i - концентрація власних носії заряду.

Підставивши (13) та (2) в вираз (1) для повного струму через $p-n$ -перехід, з використанням виразів, що включають вплив радіації (4) та (5), ми отримаємо математичну модель, що описує усю область поглинених доз радіації.

Для порівняння отриманого результату на рис. 1а представлено теоретичні ВАХ транзистора, побудовані з використанням вище вказаних параметрів та експериментальні ВАХ транзистора(рис. 2б).

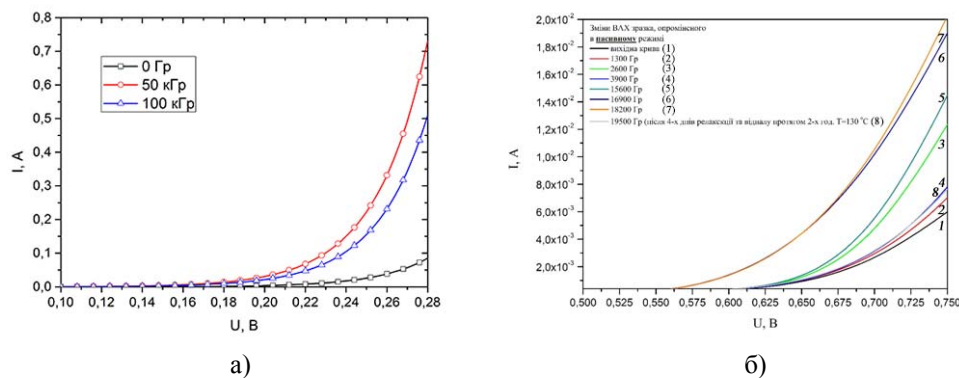


Рис. 1. Розрахункові (а) та експериментальні (б) вольт-амперні характеристики транзисторного термосенсора після поглинання декількох доз радіації.

З рисунків можна побачити, що характер поведінки розрахункових та експериментальних характеристик є подібними. За фіксованої величини струму через $p-n$ -перехід, при малих дозах опромінення спостерігається зміщення ВАХ в область нижчих падінь напруги, це свідчить, що в цій області поглинених доз переважає процес анігіляції структурних дефектів напівпровідника. При збільшенні дози опромінення, при деякій конкретній дозі, спостерігається поступове зміщення ВАХ в область більших падінь напруги, що відповідає області домінування процесу генерації нових радіаційних дефектів, тобто деградація властивостей сенсора температури. Дана область відсутня на експериментальних ВАХ-х, оскільки там представлена домінуюча дифузійна складова повного струму через $p-n$ -перехід, а для неї є характерним зміщення в область менших напруг.

Як видно з цих рисунків, теоретична ВАХ має подібний загальний характер поведінки при дії радіації, хоча явною є відмінність при низьких дозах, що викликано неточністю обраної функції. На експериментальних кривих відсутнє повернення функції до області вищих падінь напруги, що цілком вірно, так як дані характеристики зняті в області домінування дифузійної складової, для якої характерне зростання струму від поглиненої дози.

Таким чином, було отримано перший результат, який стосується опису області «ефекту малих доз», так як на сьогоднішній день подібних праць немає, тому неможна судити про вірність отриманих даних, як в позитивному так і в негативному сенсі.

Висновки. Отриманий коефіцієнт РСД відкриває можливість для широкого дослідження в цій області, слід зазначити, що потрібне повторення цього експерименту на інших зразках, для оцінки точності отриманого результату.

Побудована на основі коефіцієнту РСД математична модель впливу радіації на сенсори температури дає, в першому наближенні, хороші, нові, цікаві результати та ґрунт для майбутніх досліджень.

Уточнення моделі потребує визначення коефіцієнту k_x та функції $A(D_p, \tau_p(0))$ загалом, так як найбільшим недоліком моделі є невідповідність зміни ВАХ при низьких дозах. Тут також слід зазначити, що характер зміни ВАХ в моделі, тобто вигляд функції $A(D_p, \tau_p(0))$, залежить від режиму опромінення. Подана залежність ближча до залежності активного режиму опромінення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Шарапов В. М.* Датчики / В. М. Шарапов, И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев – Київ: «Брама», 2008. – 1072 ст.
2. *Викулина Л. Ф.* Физика сенсоров температуры и магнитного поля / Л. Ф. Викулина, М. А. Глауберман. – Одесса: «Маяк», 2000. – 244 с.
3. *Мокрицкий В. А.* Влияние радиационной обработки на параметры интегральных преобразователей температуры / В. А. Мокрицкий, В. А. Завадский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – №1. – С. 25-27.
4. *Курмашев Ш. Д.* Радиационная стойкость планарных транзисторных термодатчиков / Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2011. – №2. – С. 90-95.
5. *Павлик Б. В.* Дослідження стабільності параметрів транзисторних термосенсорів під дією рентгенівського опромінення та магнітного поля / Б. В. Павлик, А. М. Леневко, А. С. Грипа // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – №3. – С. 802-807.
6. *Павлик Б. В.* Радіаційно-стимульована перебудова дефектів у кристалах кремнію / Б. В. Павлик, Р. М. Лис, А. С. Грипа // УФЖ. – 2011. – №1. – Т. 56 – С. 65-69.
7. *Дружинін А. О.* Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: Навч. посібник / А. О. Дружинін – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 332 с.
8. *Павлик Б. В.* До проблеми радіаційно стимульованого впорядкування дефектної структури в кристалах / Б. В. Павлик, О. В. Клочан, І. О. Хвищун, Б. З. Цибуляк // Вісник Львів. ун-ту. – 2001. – №1. – Т.34. – С. 365-374.

9. *Иванов А. М.* Свойства р⁺-n-структур с заглубленным флором радиационных дефектов / А. М. Иванов, Н. Б. Строкан, В. Б. Шуман // Физика и техника полупроводников. – 1998. – №3. – Т.32. – С. 359-365.
10. *Дубинов А. Е.* W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики: Учебное пособие для вузов / А.Е. Дубинов, И.Д. Дубинова, С.К. Сайков – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. – 160 с.

Стаття: надійшла до редакції 05.05.2016,

доопрацьована 12.05.2016,

прийнята до друку 14.05.2016.

MODELING THE INFLUENCE OF RADIATION ON THE CHARACTERISTICS OF TEMPERATURE SENSORS

B. Pavlyk, A. Hrypa, O. Kravets, Ya Shmygelsky

*Ivan Franko National University of Lviv,
Tarnavskogo Str. 107, UA - 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

The influence of X-ray irradiation on electrophysical parameters of thermal sensors based on KT3117 transistor *p-n*-junction has been investigated. The analysis of characteristics of semiconductor sensors at the different temperatures, and also its changes with the influence of X-rays irradiation allow us to confirm that in the beginning of the irradiation predominate the processes of the radiation-stimulated regulation – sensor's parameters improvement.

In addition, the radiation-simulated diffusion coefficient of charge carrier (hole) has been calculated. The result was used to create a mathematical influence model of X-ray irradiation on silicon semiconductor sensors.

Keywords: thermal sensors, X-rays, *p-n*-junction, diffusion.