

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

УДК 621.586

ВИБІР РОБОЧОЇ ТОЧКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ

Б. Павлик, А. Грипа, А. Леновенко, Р. Дідик, Р. Лис,
Д. Слободзян, Й. Шикоряк, М. Кушлик

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

Досліджено вплив рентгенівського опромінення (Х-променів) та слабких магнітних полів на електрофізичні характеристики термосенсорів на базі $p-n$ -переходу транзистора 2Т363А. На підставі аналізу змін вольт-амперних характеристик доведено, що на початковій стадії рентгенівського опромінення простежується збільшення ефективності рекомбінаційних процесів в області просторового заряду і незначне зменшення величини прямого струму вольт-амперних характеристик. Зовнішнє магнітне поле ($B = 0,17$ Тл) практично не змінює ефективності рекомбінаційних процесів в області просторового заряду, однак впливає на дифузійну компоненту прямого струму через $p-n$ -перехід. З'ясовано, що робочу точку термосенсора треба вибирати на ділянці, де вольт-амперні характеристики збігаються. Дія рентгенівських променів ($D < 325$ Гр) і магнітних полів (експозиція до 15 год) практично не змінила вольт-температурні характеристики.

Ключові слова: термосенсор, рентгенівське випромінювання, магнітне поле, $p-n$ -перехід.

Напівпровідникові термоелектричні перетворювачі широко застосовують у сучасній сенсорній техніці, зокрема, для вимірювання та регулювання температури. У діапазоні температур від -50 до $+250$ °С використовують $p-n$ -переходи кремнієвих транзисторів. Застосування напівпровідникових транзисторних термосенсорів зумовлене їхньою порівняно малою вартістю, високою швидкодією і точністю вимірювання температури.

Стабільність експлуатаційних параметрів напівпровідникових термосенсорів головно визначена конструктивними особливостями сенсора [1] та дією зовнішніх чинників – радіації, магнітного поля, атмосферних умов тощо.

Відомо [2, 3], що радіаційні та структурні дефекти в напівпровідникових кристалах змінюють їхні основні характеристики та властивості. Таким дефектам у напівпровідникових кристалах відповідають глибокі енергетичні рівні в забороненій зоні. Досліджуючи параметри цих рівнів, можна вивчати поведінку самих радіаційних дефектів та прогнозувати можливі закономірності зміни характеристик відповідних сенсорів.

Задовго до виявлення магнітопластичного ефекту в діамагнітних матеріалах у праці [4] описано ефекти впливу слабких магнітних полів ($B = 0,1-1,0$ Тл) на фото- і темнову провідності напівпровідників, їхню флюоресценцію та інші фотоелектричні властивості.

Останніми роками особливо актуальною є проблема дослідження прояву електронних спінів, що локалізовані на дефектах кристалічної ґратки.

Вплив слабких магнітних полів (СМП) на структурно-чутливі характеристики через спінову взаємодію зумовлений, головню, типом дефектів, їхньою рухливістю та характером взаємодії [5, 6].

На практиці одними з високоефективних первинних термоелектричних перетворювачів є високочастотні транзистори (такі як 2Т363А), а точніше – їхні $p-n$ -переходи: емітер-база [7, 8] або колектор-база [10].

Оскільки сучасні термосенсиори часто експлуатують в умовах дії різних зовнішніх чинників, то наша мета – вибір робочої точки термосенсора на підставі дослідження закономірностей зміни їхніх характеристик, зумовлених рентгенівським опроміненням та дією слабких магнітних полів ($B = 0,17$ Тл).

Об'єкти та методика експерименту

Ми досліджували зміни характеристик структур емітер-база (із закороченим на базу колектором) та колектор-база (із закороченим на базу емітером) у транзисторах 2Т363А.

У сенсорах температури на базі $p-n$ -переходів основним дестабілізуючим параметром є дифузійна довжина пробігу носіїв заряду L , яка залежить від декількох чинників [9]:

$$L = \sqrt{D\tau_{\text{еф}}},$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\tau_{\text{еф}} = \tau_v \times \tau_s / (\tau_v + \tau_s)$ – ефективний час життя неосновних носіїв у базі; τ_v – стала часу об'ємної рекомбінації; τ_s – стала часу поверхневої рекомбінації.

Для уникнення впливу цих чинників потрібно, щоб виконувалась умова – геометрична ширина бази W була набагато меншою, ніж дифузійна довжина пробігу носіїв заряду L ($W \ll L$). Цим параметрам добре відповідають високочастотні $p-n-p$ -транзистори 2Т363А.

Для сенсорів, які працюють на прямій гілці вольт-амперної характеристики, робочим параметром є зміна спаду напруги зі зміною температури за заданого і постійного прямого струму через $p-n$ -перехід. Величину цього струму вибирають так, щоб уникнути саморозігрівання сенсора та, відповідно, усунути його внесок у вимірювання температури. З'ясовано, що оптимальною величиною струму зміщення може бути $I \approx 0,05-0,1$ мА [7]. Додатковою умовою у виборі робочої точки може бути те, щоб ділянки ВАХ у вибраній точці збіглися.

Під час експерименту зразки з однаковими вихідними характеристиками розділили на дві групи. Першу групу піддавали впливу однорідного постійного магнітного поля з індукцією $B = 0,17$ Тл, другу – опромінювали рентгенівськими променями впродовж певних проміжків часу. Після цього вимірювали вольт-амперні (ВАХ), та вольт-температурні характеристики (ВТХ) відповідних $p-n$ -переходів термосенсора. Зразки опромінювали за допомогою рентгенівської установки з напругою прискорювального поля $U = 45$ кВ, струм пучка електронів $I = 8$ мА, W-антикатод.

Для зняття вольт-температурних характеристик використовували принципову схему, зображену на рис. 1, термостат "Thermostat U10", терморегулятор RE-205 (версія програми 808) з мідь-константановою термопарою (точність вимірювання температури $\pm 0,1$ °C).

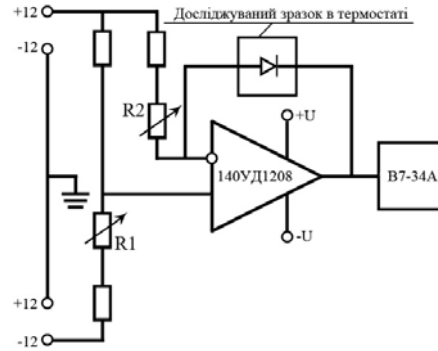


Рис. 1. Схема для вимірювання вольт-температурних характеристик зразків.

Потенціометром $R1$ виставляють нуль на вході підсилювача, потенціометром $R2$ – величину робочого струму.

Стабільність експлуатаційних характеристик напівпровідникових термосенсорів на базі прямої гілки ВАХ $p-n$ -переходу кремнієвих транзисторних структур головно визначена процесами, що відбуваються в області перехідного шару контакту. За даними оже-спектроскопії такий перехідний шар має товщину $\approx 20-50$ нм.

Аналіз закономірностей зміни ВАХ, зумовлених дією зовнішніх чинників, дає змогу отримати нову інформацію про перебудову структурних дефектів та можливі причини деградації термосенсорів.

Відомо [11], що кремнієві $p-n$ -структури з низьколегованою базою мають мале значення ($\sim 10^{-7}-10^{-8}$ А) прямого та зворотного струмів на початкових ділянках ВАХ. Величина зворотного струму через $p-n$ -перехід визначена ефективністю термогенерації неосновних носіїв заряду і швидкістю їхнього переходу до межі поділу.

У разі прямого зміщення, коли в генераційно-рекомбінаційних явищах в області просторового заряду домінують процеси захоплення носіїв заряду, рекомбінаційну складову повного струму описує вираз

$$I_R = \frac{qn_i L}{\tau} \cdot \frac{kT}{\phi_0} \cdot \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right),$$

де ϕ_0 – висота потенціального бар'єра; $\tau = \sqrt{\tau_{n0} / \tau_{p0}}$ – час життя неосновних носіїв заряду.

Подальше збільшення прикладеного прямого зміщення супроводжується експоненціальним збільшенням струму через $p-n$ -перехід, що зумовлений дифузійною складовою:

$$I_D = I_S \exp(qU / kT - 1),$$

де $I_S = qD_p p_{n0} / L_p + qD_n n_{p0} / L_n$, D_p і D_n – коефіцієнт дифузії дірок і електронів, відповідно; L_p і L_n – їхні дифузійні довжини пробігу.

Повний прямий струм через $p-n$ -перехід у певному наближенні ($p_{n0} \gg n_{p0}$ і $U \geq kT/q$) можна визначити як суму цих струмів. Оскільки реальна ширина ОПЗ, у якій відбуваються рекомбінаційні процеси, є дещо меншою, ніж W , то можна вважати, що

$I_{\text{пов}} \sim \exp(qU/nkT)$, де, коефіцієнт $n = 2$, якщо домінує рекомбінаційна складова струму; $n = 1$, якщо домінує дифузійна складова; $n = 1-2$, якщо ці обидві компоненти сумірні за значенням.

На початковій ділянці (0,20–0,75 В) прямої гілки ВАХ величина струму через обидва $p-n$ -переходи визначена швидкістю розтікання і рекомбінації інжектованих носіїв заряду в ОПЗ, а також дії рентгенівського опромінення та магнітного поля (рис. 2, а, б).

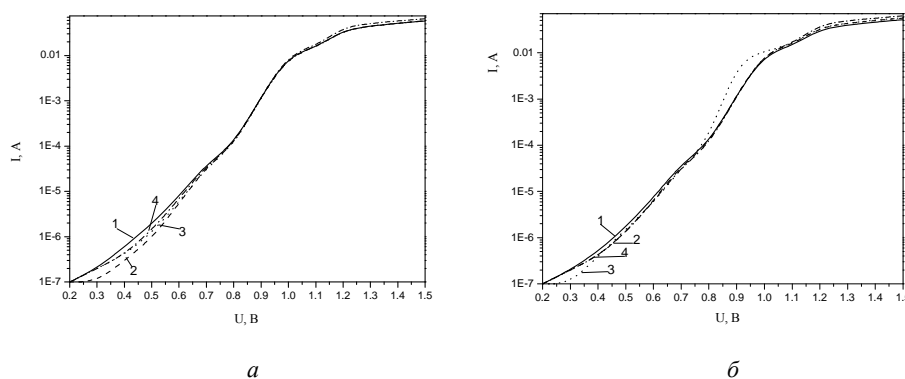


Рис. 2. Зміна вольт-амперної характеристики колекторного $p-n$ -переходу сенсора після впливу рентгенівського опромінення (а) та постійного магнітного поля (б).
 а: 1 – вихідна крива; 2 – після опромінення дозою 65 Гр; 3 – після опромінення дозою 195 Гр; 4 – після опромінення дозою 325 Гр.
 б: 1 – вихідна крива; 2 – після 5-годинної витримки; 3 – після 10-годинної витримки; 4 – після 15-годинної витримки.

Як бачимо з рис. 2, а, на початковій стадії опромінення (крива 2) простежується збільшення ефективності рекомбінаційних процесів і зменшення величини прямого струму через перехід колектор–база. Зовнішнє магнітне поле практично не змінює ефективності рекомбінаційних процесів в ОПЗ, оскільки товщина ОПЗ ($W \ll L$) і концентрація центрів рекомбінації є достатньо малими. Закономірності змін ВАХ емітерного переходу подібні до змін, яких зазнає перехід колектор–база після дії радіації і магнітного поля, тільки з дещо меншими значеннями відповідних сигналів.

В інтервалі прямих зміщень від 0,75–1,00 В у повному струмі через $p-n$ -перехід починає домінувати дифузійна складова струму. Експозиція зразка тривалістю 10 год у постійному магнітному полі стимулює збільшення величини прямого струму, а подальше збільшення часу експозиції приводить до того, що експериментальна крива ВАХ повертається у вихідне положення. Магнітостимульована зміна концентрації носіїв заряду зумовлена перебудовою структурних дефектів, які перебувають у нерівноважному метастабільному стані. Суть дії СМП полягає не в “енергетичній” взаємодії, а у знятті певних спінових заборон, що дає змогу усунути суперечності між малою магнітною енергією і макроскопічними процесами еволюції дефектів [4].

У сучасній науковій літературі нема єдиного пояснення механізму взаємодії СМП з немагнітними кристалами. Розглядають декілька можливих механізмів. На нашу думку, перебудова метастабільних дефектних станів під дією СМП відбувається через зняття

спінових заборон. Для цього повинні виконуватись декілька умов. По-перше, такий механізм не повинен заперечувати закони термодинаміки. По-друге, залежно від взаємної орієнтації спінів елементарна пара зі спінами $S = \pm 1/2$ може перебувати у двох можливих станах: синглетному (S), коли $\sum_{1,2} S_i = 0$, і триплетному (T), коли $\sum_{1,2} S_i = 1$. Магнітне поле може забезпечити спінову конверсію тільки за умови, що $\Delta U_m \approx U_T - U_S$. У такому стані пара може перебувати в разі її переходу із основного стану у метастабільний під дією зовнішніх чинників. У цьому разі час життя в проміжному стані повинен бути більшим, ніж час життя спінової конверсії в магнітному полі.

Ідея про роль S - T -переходів у процесах рекомбінації пар і можливих механізмах впливу на них зовнішнього магнітного поля описана в праці [4]. Такий хід експериментальних кривих можна пояснити магнітостимульованим переходом деяких дефектів із метастабільного стану в основний, або квазірівноважний. Енергії прикладеного електричного поля є достатньо для переходу носіїв заряду з цих центрів у зону провідності. Подальше збільшення напруги прямого зміщення ($U > 1$ В) супроводжується також збільшенням спаду напруги на об'ємі бази, що приводить до поступового зменшення зміни прямого струму через p - n -перехід.

Зазначимо, що ця дія рентгенівських променів і магнітних полів практично не змінила вольт-температурних характеристик переходу емітер-база, а зміни ВТХ переходу колектор-база (рис. 3) є в межах допустимої похибки експерименту, що свідчить про правильний вибір робочої точки термосенсора.

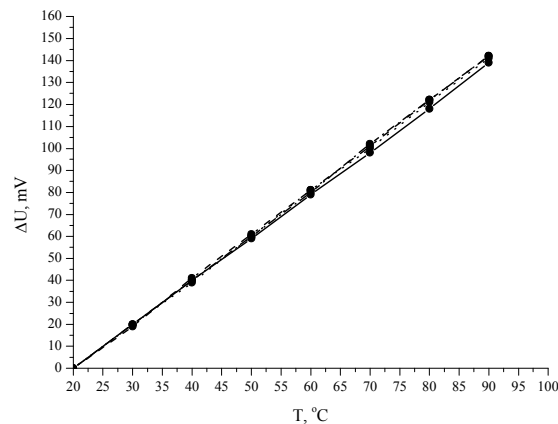


Рис. 3. Зміна вольт-температурних характеристик термосенсора (перехід колектор-база) після впливу рентгенівського опромінення.

Отже, у полі дії малих доз рентгенівського опромінення ($D < 325$ Гр) і невеликих магнітних полів ($T = 0,17$ Тл) у транзисторних термосенсорах відбувається перебудова метастабільних дефектних центрів, однак вона за правильного вибору робочої точки не впливає на ВТХ.

Термосенсори на базі прямої гілки ВАХ транзисторів 2Т363А є придатними для їхнього використання в полях дії рентгенівського опромінення і слабких магнітних полів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Shwarts Yu. M.* Limiting characteristics of diode temperature sensors / Yu. M. Shwarts, V. L. Borblik, N. R. Kulish [et al.] // *Sensors and Actuators*. – 2000. – N 86. – С. 197–205.
2. *Винецкий В. Л.* Радиационная физика полупроводников / В. Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. – Киев : Наук. думка, 1979. – 335 с.
3. *Махкамов Ш.* Об особенностях образования радиационных дефектов в кремниевых структурах / Ш. Махкамов, Н. Турсунов, М. Ашуров [и др.] // *ЖТФ*. – 1999. – Т. 69, № 1. – С. 121–123.
4. *Головин Ю. Н.* Магнитопластичность твёрдых тел. (Обзор) / Ю. Н. Головин // *Физика тв. тела*. – 2004. – Т. 46, вып. 5. – С. 769–803.
5. *Моргунов Р. Б.* Спиновая микромеханика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // *УФН*. – 2004. – Т. 174, № 2. – С. 131–153.
6. *Макара В. А.* О влиянии постоянного магнитного поля на электропластический эффект в кристаллах кремния / В. А. Макара, Л. П. Стебленко, Н. Я. Горидько // *Физика тв. тела*. – 2001. – Т. 43, вып. 3. – С. 462–468.
7. *Вавилов В. С.* Действие излучений на полупроводники / В. С. Вавилов, Н. П. Кекелидзе. – М. : Наука, 1988. – 190 с.
8. *Василюк В. М.* Високоякісні сенсори на основі кремнієвого *p-n*-переходу / В. М. Василюк, А. М. Леновенко, Н. О. Ковальчук // *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*. – 2006 – № 3. – С. 26–29.
9. *Shwarts Yu. M.* Simulation of low-temperature current flow and sensitivity in Si diode temperature sensors / Yu. M. Shwarts, M. M. Shwarts, O. M. Ivashchenko [et al.] // *Ukr. J. Phys.* – 2004. – Vol. 49, N 10. – P. 1000–1005.
10. *O'Neil P.* Transistor – a hot tip for accurate temperature sensing / P. O'Neil, C. Derrington. // *Electronics* (October). – 1979. – P. 137–141.
11. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
12. *Павлык Б.В.* Влияние магнитного поля на электрофизические свойства поверхностно-барьерных структур *Vi-Si-Al* / Б.В. Павлык, А.С. Грыпа, Д.П. Слободзян [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2011. – Т. 45, вып. 5. – С. 608–611.

Стаття: надійшла до редакції 05.05.2014,
доопрацьована 12.05.2014,
прийнята до друку 14.05.2014.

**CHOICE OF WORKING POINT OF SEMICONDUCTOR
TEMPERATURE SENSORS****B. Pavlyk, A. Hrypa, A. Lenovenko, R. Didyk, R. Lys, D. Slobodzyan,
J. Shykoryak, M. Kushlyk***Ivan Franko National University of Lviv, Faculty of Electronics
Tarnavskogo Str. 107, UA - 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

The influence of X-ray irradiation and weak magnetic field on electrophysical parameters of thermal sensors based on 2T363A transistor p-n-junction has been investigated. From the analysis of current-voltage characteristics it is shown that at the initial stage of X-ray radiation influence the increase of efficiency of recombination processes in the space charge region (SCR) and slight decrease of the direct current are observed. The external magnetic field ($B = 0,17$ Tl) does not change the efficiency of recombination processes in SCR, but make the impact on the diffusion component of direct current through p-n-junction. It is shown that thermosensor working point should be chosen on the area where the current-voltage characteristics overlap. The effect of X-rays ($D < 325$ Gy) and weak magnetic field (exposure to 15 hours) almost did not change the temperature response curve.

Keywords: thermal sensors, X-rays, magnetic field, p-n-junction

**ВЫБОР РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРЫ****Б. Павлык, А. Грыпа, А. Леновенко, Р. Дидык, Р. Лыс, Д. Слободзян,
И. Шикоряк, М. Кушлык***Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017, Львов, Украина
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

Исследовано влияние рентгеновского облучения (X-лучей) и слабых магнитных полей на электрофизические характеристики термосенсоров на базе p-n-перехода транзистора 2T363A. Из анализа изменений вольт-амперных характеристик показано, что на начальной стадии рентгеновского облучения наблюдается увеличение эффективности рекомбинационных процессов в области пространственного заряда и незначительное уменьшение величины прямого тока вольт-амперных характеристик. Внешнее магнитное поле ($B = 0,17$ Тл) практически не изменяет эффективности рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, но влияет на диффузионную компоненту прямого тока через p-n-переход. Показано, что рабочую точку термосенсора следует выбирать на участке, где вольт-амперные характеристики совпадают. Действие рентгеновских лучей ($D < 325$ Гр) и магнитных полей (экспозиция до 15 часов) практически не изменяет вольт-температурных характеристик.

Ключевые слова: термосенсор, рентгеновское излучение, магнитное поле, p-n-переход.