

Б.В. Павлик, А.М. Леновенко, А.С. Грипа

Дослідження стабільності параметрів транзисторних термосенсорів під дією рентгенівського опромінення та магнітного поля

*Львівський національний університет імені Івана Франка, факультет електроніки,
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна, pavlyk@electronics.wups.lviv.ua, hrypaas@gmail.com*

Представлені параметри, яким повинні відповідати кремнієві транзистори, придатні для використання в термометрії.

Досліджено вплив рентгенівського опромінення (X-променів) та слабких магнітних полів на електрофізичні характеристики термосенсорів на базі р-n-переходу транзистора 2Т363А.

З аналізу змін вольт-амперних (ВАХ) та вольт-фарадних характеристик (ВФХ), показано, що на початковій стадії рентгенівського опромінення спостерігається збільшення ефективності рекомбінаційних процесів в області просторового заряду і незначне зменшення величини прямого струму ВАХ, що можна пояснити ефектом руйнування метастабільних структурних дефектів бази транзистора. Зовнішнє магнітне поле ($B = 0,17$ Тл) практично не змінює ефективності рекомбінаційних процесів в ОПЗ, але проявляє вплив на дифузійну компоненту прямого струму через р-n-перехід.

Дія рентгенівських променів ($D < 325$ Гр) і магнітних полів (експозиція до 15 годин) практично не змінила вольт-температурні характеристики, з чого можна зробити висновок про стабільність робочих характеристик у вищезгаданих умовах.

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

Стаття постуила до редакції 04.04.2012; прийнята до друку 15.06.2012.

Вступ

Напівпровідникові термоелектричні перетворювачі знаходять широке застосування в сучасній сенсорній техніці, зокрема, для вимірювання та регулювання температури в діапазоні $-50^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ використовуються р-n-переходи кремнієвих транзисторів. Використання напівпровідникових транзисторних термосенсорів зумовлено їх відносно малою вартістю виробництва, високою швидкодією і точністю вимірювання температури.

Стабільність експлуатаційних параметрів напівпровідникових термосенсорів в значній мірі визначається конструктивними особливостями сенсора [1] та дією зовнішніх факторів – радіації, магнітного поля, атмосферних умов і т. п.

Відомо [2, 3], що радіаційні та структурні дефекти в напівпровідникових кристалах змінюють їх основні характеристики та властивості. Таким дефектам в 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 діамантних матеріалах у роботі [4] були описані ефекти впливу слабких магнітних полів ($B = 0,1 - 1,0$ Тл) на фото- і темнову провідності напівпровідників, їх флюоресценцію та інші фотоелектричні властивості. В останні роки 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 головно типом дефектів, їх рухливістю та характером взаємодії [5, 6].

Для вивчення параметрів глибоких рівнів, що зумовлені наявністю відповідних дефектів, існує низка способів. Ємнісні методики, які забезпечують високу чутливість, аналіз спектру глибоких рівнів майже по всій ширині забороненої зони, визначення параметрів глибоких центрів [7, 8], є особливо інформативними.

На практиці одними з високоефективних первинних термоелектричних перетворювачів є високочастотні транзистори (такі як 2Т363А), а точніше їх р-n-переходи: емітер-база [9, 10] або

колектор-база [11]. Фізичні процеси в контактних структурах такого типу можна ефективно досліджувати за допомогою емнісних методик, оскільки база цих транзисторів є слабо легованою і практично більша частина області просторового заряду локалізована в приповерхневому шарі бази. Цей факт забезпечує високу чутливість методики при вивченні процесів еволюції дефектів р-п-структур, що зумовлена дією зовнішніх факторів.

Оскільки сучасні термосенсори часто експлуатуються в умовах дії різних зовнішніх чинників, тому метою даної роботи було дослідження закономірностей зміни характеристик транзисторних термоперетворювачів, що зумовлені рентгенівською радіацією та слабкими магнітними полями ($B = 0,17$ Тл).

I. Об'єкти та методика експерименту

У даній роботі 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 основі р-п-переходів основним дестабілізуючим параметром є дифузійна довжина пробігу носіїв заряду L , яка залежить від декількох чинників [9]:

$$L = \sqrt{Dt_{ef}},$$

де D – коефіцієнт дифузії; $t_{ef} = \frac{t_v t_s}{t_v + t_s}$ –

ефективний час життя неосновних носіїв у базі; t_v – постійна часу об'ємної рекомбінації; t_s – постійна часу поверхневої рекомбінації.

Для уникнення впливу цих факторів 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 р-п-р-транзистори 2Т363А. Для досліджень були відібрані транзистори з такими ж вихідними характеристиками.

Для сенсорів, які працюють на прямій вітці вольт-амперної характеристики робочим параметром є зміна спаду напруги зі зміною температури при заданому і постійному прямому струмі через р-п-перехід. Величина цього струму вибирається так, щоб уникнути саморозігріву сенсора та, відповідно, усунути його вклад у вимірювання температури. Встановлено, що оптимальною величиною струму зміщення може бути $I \approx 0.05 \div 0.1$ мА [9].

Під час експерименту зразки з однаковими вихідними характеристиками були поділені 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 чого вимірювали вольт-амперні (ВАХ), вольт-фарадні

(ВФХ) та вольт-температурні характеристики (ВТХ) відповідних р-п-переходів термосенсора. Опромінювались зразки за допомогою рентгенівської установки з напругою прискорюючого поля $U=45$ кВ, струм пучка електронів становив $I=8$ мА, W-антикатод. Для зняття вольт-температурних характеристик використовували принципову схему, зображену на рис. 1, термостат "Thermostat U10", терморегулятор RE-205 версія 808 з мідь-

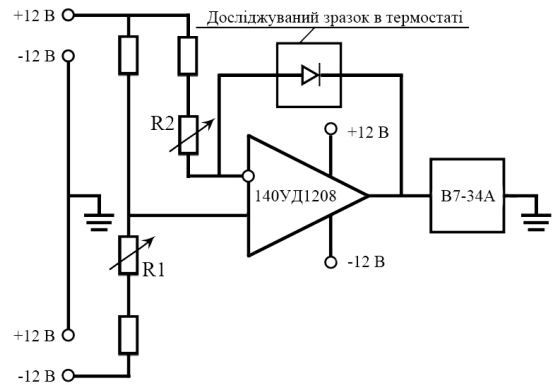


Рис. 1. Схема для вимірювання вольт-температурних характеристик зразків.

константовою термопарою (точність вимірювання температури $\pm 0,1$ °С). Потенціометром R1 виставляли нуль на вході підсилювача, а потенціометром R2 встановлювали величину робочого струму. ВФХ досліджували з допомогою емнісно-модуляційного спектрометра ГУ7-1 (УРАН-1) на частоті $f = 125$ кГц, з точністю вимірювання ємності $\pm 0,01$ пФ.

II. Отримані результати та їх обговорення

Стабільність експлуатаційних характеристик напівпровідникових термосенсорів на базі прямої вітки ВАХ р-п-переходу кремнієвих транзисторних структур у значній мірі визначається процесами, що відбуваються в області перехідного шару контакту. За даними Оже-спектроскопії такий перехідний шар має товщину $\approx 20 - 25$ нм.

Аналіз закономірностей зміни ВАХ і ВФХ, що зумовлені дією зовнішніх чинників, дає можливість отримати нову інформацію про перебудову структурних дефектів при поверхневого шару кристалу та можливі причини деградації термосенсорів.

Відомо [12], що кремнієві р-п-структури з низьколегованою базою володіють малим значенням ($\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ А) зворотного та прямого струмів на початкових ділянках ВАХ. Величина зворотного струму через р-п-перехід визначається ефективністю термогенерації неосновних носіїв заряду і швидкістю їх переходу до межі поділу.

При прямому зміщенні, коли в генераційно-рекомбінаційних явищах в області просторового

заряду (ОПЗ) домінуючими є процеси захоплення носіїв заряду, рекомбінаційна складова повного струму описується виразом:

$$I_R = \frac{qn_i L}{t} \cdot \frac{kT}{j_0 - qU} \cdot e^{\frac{qU}{2kT}},$$

де j_0 – висота потенціального бар'єру, $t = \sqrt{t_{n0}/t_{p0}}$ – час життя неосновних носіїв заряду.

Подальше збільшення величини прикладеного прямого зміщення супроводжується експоненціальним збільшенням струму через р-п-перехід, що зумовлений дифузійною складовою:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right),$$

де $I_S = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}$, D_p і D_n –

коефіцієнт дифузії дірок і електронів відповідно, L_p і L_n – їх дифузійні довжини пробігу.

Повний прямий струм через р-п-перехід в певному наближенні ($p_{n0} \gg n_{p0}$ і $U \geq \frac{kT}{q}$) можна

визначити як суму цих струмів. Враховуючи те, що реальна ширина ОПЗ, в якій відбуваються рекомбінаційні процеси, є дещо меншою, ніж W ,

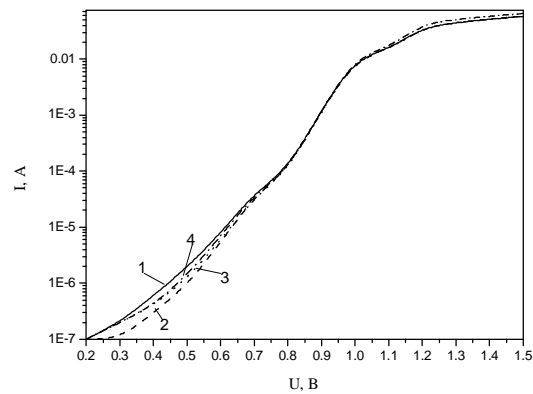
можна вважати, що $I_{пов} \sim \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right)$, де, коефіцієнт

$n = 2$, якщо домінує рекомбінаційна складова струму; $n = 1$, якщо домінує дифузійна складова; $n = 1 - 2$, якщо ці обидва компоненти є співмірні за величиною.

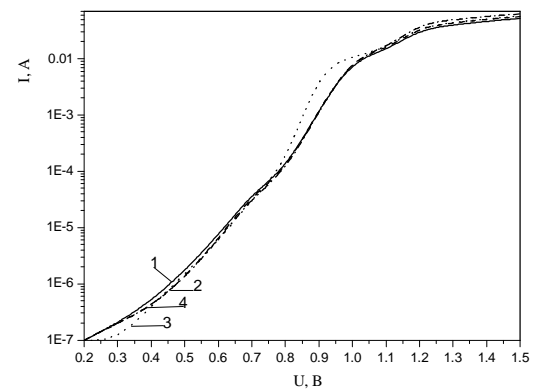
На початковій ділянці (0,20 – 0,75 В) прямої вітки ВАХ величина струму через обидва р-п-переходи визначається швидкістю розтікання і рекомбінації інжектованих носіїв заряду в ОПЗ, а також дією рентгенівського опромінення та магнітного поля (рис. 2,а та 2,б).

Як видно з рис. 2,а на початковій стадії опромінення (крива 2) спостерігається 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 величинами. Закономірності змін ВАХ емітерного переходу є подібними до змін, яких зазнає перехід колектор-база після дії радіації і магнітного поля, тільки з дещо меншими величинами відповідних сигналів.

В інтервалі прямих зміщень від 0,75 до 1,00 В у повному струмі через р-п-перехід починає домінувати дифузійна складова струму. Експозиція зразка тривалістю 10 годин в постійному магнітному



а)



б)

Рис. 2. Зміна вольт-амперної характеристики колекторного р-п-переходу сенсора після впливу рентгенівського опромінення та постійного магнітного поля. 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 витримки протягом 5 год; 3 – після витримки протягом 10 год; 4 – після витримки протягом 15 год.

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 в нерівноважному метастабільному стані. Суть дії СМП полягає не в “енергетичній” взаємодії, а у знятті певних спінових заборон, що дозволяє усунути протиріччя між малою магнітною енергією і макроскопічними процесами еволюції дефектів [4].

В сучасній науковій літературі не існує єдиного пояснення механізму взаємодії слабких МП з немагнітними кристалами. Розглядається 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, в залежності від

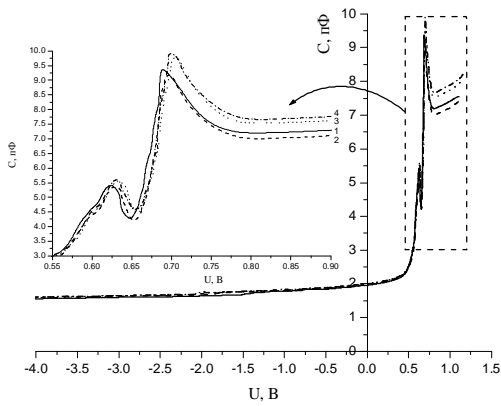


Рис. 3. Зміна вольт-фарадних характеристик сенсора (перехід емітер-база) після впливу рентгенівського опромінення. 1 – вихідна крива, 2 – після опромінення дозою 65 Гр, 3 – після опромінення дозою 195 Гр, 4 – після опромінення дозою 325 Гр.

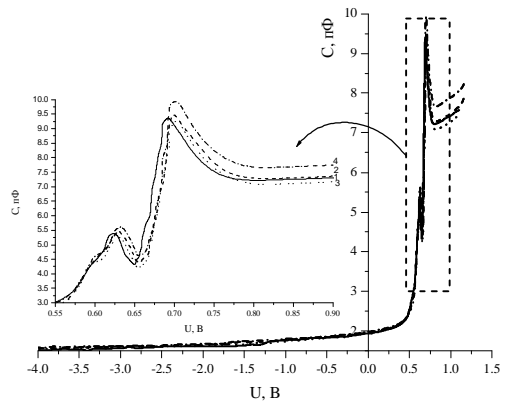


Рис. 5. Зміна вольт-фарадних характеристик сенсора (перехід емітер-база) після впливу магнітного поля. 1 – вихідна крива; 2 – після витримки протягом 5 год; 3 – після витримки протягом 10 год; 4 – після витримки протягом 15 год.

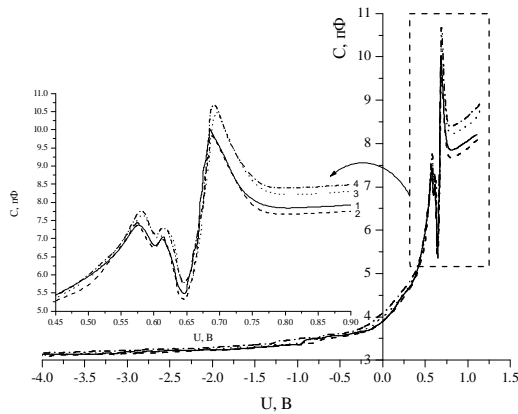


Рис. 4. Зміна вольт-фарадних характеристик сенсора (перехід колектор-база) після впливу рентгенівського опромінення. 1 – вихідна крива, 2 – після опромінення дозою 65 Гр, 3 – після опромінення дозою 195 Гр, 4 – після опромінення дозою 325 Гр.

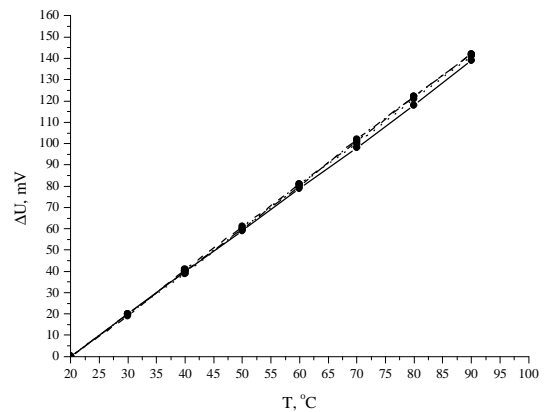


Рис. 6. Зміна вольт-температурних характеристик сенсора (перехід колектор-база) після впливу рентгенівського опромінення.

взаємної орієнтації спінів елементарна пара із спінами $S = \pm \frac{1}{2}$ 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 $\Delta U_m \approx U_T - U_S$. В такому стані пара може перебувати у разі її переходу із основного стану у метастабільний під дією зовнішніх чинників. При цьому час життя в проміжному стані повинен бути більшим, ніж час життя спінової конверсії в МП.

Ідея про роль S-T переходів в процесах рекомбінації пар і можливих механізмах впливу на них зовнішнього МП, описана в роботі [4]. Такий хід

експериментальних кривих можна пояснити магнітостимульованим переходом деяких дефектів з 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 ($U > 1\text{В}$) супроводжується також збільшенням падіння напруги на об'ємі бази, що приводить до поступового зменшення величини прямого струму через p-n-перехід.

На рис. 3 показані зміни ВФХ емітерного переходу транзисторного термосенсора, що зумовлені дією X-променів. Як видно з рисунка, основні зміни ВФХ спостерігаються в області додатних значень напруг на переході. Відомо [13], що відкритий p-n-перехід володіє дифузійною ємністю, яка у декілька разів є більшою, ніж ємність закритого переходу. Дифузійна ємність виникає в

процесі протікання через перехід прямого струму інжектіваних носіїв заряду. Змінюючи напругу на р-п-переході, ми міняємо діркову і електронну складові струму в ОПЗ, і, тим самим, змінюємо величини відповідних зарядів.

На ВФХ переходу емітер-база (рис. 3) спостерігаються два характерні максимуми у разі прямих зміщень $U_{\text{пр}}^1 = 0,685 \text{ В}$ і $U_{\text{пр}}^2 = 0,625 \text{ В}$, а на ВФХ переходу колектор-база (рис. 4) є три максимуми – $U_{\text{пр}1} = 0,685 \text{ В}$, $U_{\text{пр}2} = 0,615$ і $U_{\text{пр}3} = 0,575 \text{ В}$. Фізична природа максимуму при $U_{\text{пр}} = 0,685 \text{ В}$ описана в науковій літературі [14] і пояснюється наявністю вбудованого додатного заряду в контактній області р-п-переходу. Наявність ще двох характерних максимумів в інтервалі прямих зміщень від 0,55 до 0,65 В, на нашу думку, зумовлена домішковими та вакансійними зарядами, що локалізовані на дефектах перехідного шару. Для встановлення точнішої природи цих структурних дефектів потрібні додаткові дослідження.

На рис. 5 представлені зміни ВФХ переходу емітер-база, що стимульовані експозицією в магнітному полі ($B = 0,17 \text{ Тл}$). П'ять і десять годин витримки термосенсора в магнітному полі практично не змінюють величини максимальної ємності і амплітудного значення величини характерних максимумів на ВФХ. При цьому, відбувається зсув

ВФХ в напрямку більших додатних напруг вже при перших 5 годинах експозиції, що свідчить про магнітостимульовану зміну напруги плоских зон, що зумовлена зміною зарядового стану окремих метастабільних дефектів.

Якщо на ВАХ дія магнітного поля проявлялась у збільшенні прямого струму, який зумовлений дифузійною компонентою, то на ВФХ експозиція 15 годин в магнітному полі супроводжується збільшенням величини характерного максимуму ($U_{\text{пр}} = 0,685 \text{ В}$) на 8,1%. Це свідчить про збільшення величини вбудованого додатного заряду в приповерхневому шарі контакту двох напівпровідників.

На закінчення необхідно відзначити, що дана дія рентгенівських променів і магнітних полів практично не змінила вольт-температурних характеристик переходу емітер-база, а зміни ВТХ переходу колектор-база є в межах допустимої похибки експерименту. Тому можна стверджувати, що:

в полі дії малих доз рентгенівського опромінення ($D < 325 \text{ Гр}$) і невеликих магнітних полів ($T = 0,17 \text{ Тл}$) в транзисторних термосенсорах відбувається перебудова метастабільних дефектних центрів, але вона не впливає на ВТХ;

термосенсиори на базі прямої вітки ВАХ транзисторів 2Т363А є придатними для їх використання в полях дії рентгенівського опромінення і слабких магнітних полів.

- [1] Yu.M. Shwarts, V.L. Borblik, N.R. Kulish, E.F. Venger, V.N. Sokolov. Limiting characteristics of diode temperature sensors // *Sensors and Actuators*. **86**, сс. 197-205 (2000).
- [2] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников*. – Киев. Наукова думка, С. 335 (1979).
- [3] Ш. Махкамов, Н.А. Турсунов, М. Ашуров, Р.П. Сандов, С.В. Мартыненко. Об особенностях образования радиационных дефектов в кремниевых структурах // *ЖТФТ*, **69**(1), сс. 121-123 (1999).
- [4] Ю.Н. Головин. Магнитоэластичность твердых тел. (Обзор) // *ФТТ*, **46**(5), сс. 769-803 (2004).
- [5] Р.Б. Моргунов. Спиновая микромеханика в физике пластичности // *УФН*, **174**(2), сс. 131-153 (2004).
- [6] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец. О влиянии постоянного магнитного поля на электропластический эффект в кристаллах кремния // *ФТТ*, **43**(3), сс. 462-468 (2001).
- [7] В. С. Вавилов, Н. П. Кекелидзе. *Действие излучений на полупроводники*. – Москва. Наука, 190 с. (1988).
- [8] D. Cavalcoli, A. Cavallini, M. Rossi, S. Pizzini. Micro- and nano-structures in silicon studied by DLTS and scanning probe methods // *FTP*, **41**(4), pp. 435-440 (2007).
- [9] В.М. Василюк, А.М. Леновенко, Н.О. Ковальчук. Високоякісні сенсори на основі кремнієвого р-п-переходу // *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, **3**, сс. 26-29 (2006).
- [10] Yu. M. Shwarts, M. M. Shwarts, O. M. Ivashchenko, O. V. Kondrachuk, L. I. Shpinar. Simulation of low-temperature current flow and sensitivity in Si diode temperature sensors // *Ukr. J. Phys.* **49**(10), pp. 1000-1005 (2004).
- [11] P. O'Neil and, C. Derrington. Transistor – a hot tip for accurate temperature sensing // *Electronics* (October), pp. 137-141 (1979).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. – Москва, «Мир». с. 456 (1984).
- [13] В.Г. Головки. *Полупроводниковые емкости*. – Новосибирск, изд. «Наука», с. 49 (1987).
- [14] Б.В. Павлик, А.С. Грипа, Д.П. Слободзян, Р.М. Лыс, И.А. Шикоряк, Р.И. Дидык. Влияние магнитного поля на электрофизические свойства поверхностно-барьерных структур Bi-Si-Al // *Физика и техника полупроводников*. **45**(5), сс. 608-611 (2011).

B. Pavlyk, A. Lenovenko, A. Hrypa

The Investigation of the Influence of X-ray Irradiation and Weak Magnetic Field on the Parameters Stability of Transistor Temperature Sensors

*Ivan Franko National University of L'viv
Tarnavs'kogo, st, 107, 79017 L'viv, Ukraine*

The parameters with which the transistors that are suitable for use in thermometry must be complied are presented.

The influence of X-ray irradiation and weak magnetic field on electrophysical parameters of thermal sensors has been investigated.

From the analysis of current-voltage and capacitance-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. It can be explained by the effect of destruction of metastable structural defects of the base. 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.

The effect of X-rays ($D<325$ Gr) and weak magnetic field practically did not change the temperature response curve, leading to a conclusion about the parameters stability at above conditions.

Key words: thermal sensors, X-rays, magnetic field, p-n-junction.