

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

ГРИПА АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 53.09; 538.971; 621.315.592

**РАДІАЦІЙНО-СТИМУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ В КРЕМНІЄВИХ
ТРАНЗИСТОРНИХ ТЕРМОСЕНСОРАХ**

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ЛЬВІВ-2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі сенсорної та напівпровідникової електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор
Павлик Богдан Васильович,
Львівський національний університет
імені Івана Франка, завідувач кафедри сенсорної та
напівпровідникової електроніки

Офіційні опоненти доктор фізико-математичних наук, професор
Лепіх Ярослав Ілліч,
директор Міжвідомчого науково-навчального
фізико-технічного центру при
Одеському національному університеті
імені Іллі Мечникова

доктор фізико-математичних наук, професор
Шпотюк Олег Йосипович,
заступник директора з наукової роботи
Науково-виробничого підприємства “Карат”, м. Львів

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2016 р. о 15³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.051.09 при Львівському національному університеті імені Івана Франка за адресою: 79005, м. Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8, фізичний факультет, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського національного університету імені Івана Франка за адресою: 79005, Україна, м. Львів, вул. Драгоманова, 5.

Автореферат розісланий «___» _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
професор



Б. В. Павлик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Базовим матеріалом сучасної мікроелектроніки є кремній та структури на його основі. На сьогоднішній день у науковій літературі вже нагромаджений достатньо великий об'єм інформації про взаємодію іонізуючих електромагнітних випромінювань з кристалами кремнію і структурами на їхній основі. Однією з основних тенденцій розвитку сучасної напівпровідникової електроніки є підвищення радіаційної стійкості приладів сенсоріки. Серед усього різноманіття датчиків фізичних величин особливої уваги заслуговують сенсори температури. Вони працюють за різними фізичними принципами, виготовляються з різних матеріалів і можуть використовуватися у екстремальних умовах. Наприклад, в металургії, космонавтиці, атомній енергетиці і т. п. найбільш широко використовуються мікроелектронні сенсори температури.

Останнім часом, в діапазоні температур від -50°C до $+250^{\circ}\text{C}$, найбільш перспективними вважаються напівпровідникові сенсори на базі діодних і транзисторних р-п-структур. Температурний контроль з використанням таких структур здійснюється за допомогою первинних перетворювачів із напруговим, струмовим, або частотним виходом. Хоча такі структури можна використовувати як сенсори температури на прямій і зворотній вітках вольт-амперної характеристики, проте найчастіше для виміру температури використовують спад прямого зміщення на транзисторному емітерному р-п-переході.

Суттєвими перевагами таких сенсорів є широкий діапазон вимірюваних температур, низька інерційність, лінійність температурної характеристики, простота обробки вихідного сигналу, відносно низька собівартість виготовлення. Залежність спаду напруги на р-п-переході в прямому зміщенні від температури є стабільною, оскільки опір р-п-переходу в такому випадку є в 10^4 - 10^5 раз меншим, ніж у зворотному, а шунтуючий вплив поверхневих каналів є незначним.

Як термоелектричний параметр транзистора часто використовують прямий спад напруги на емітерному р-п-переході за постійного значення струму емітера та із закороченим колекторним переходом, тобто у випадку ввімкнення транзистора в режимі транзисторного діода. Хоча за такого ввімкнення характеристики транзистора є еквівалентними до характеристик діода, проте їхня відтворюваність є вищою, ніж у діодів, оскільки їхня залежність від впливу опору бази та рекомбінаційних процесів в базовій області є меншою.

Проте проблеми деградації і довговічності експлуатаційних характеристик, особливо в полі дії різних зовнішніх чинників, все ще залишаються не повністю розв'язані. Велика увага приділяється врахуванню можливих керованих радіаційно-стимульованих змін параметрів напівпровідникових термосенсорів на їхню точність вимірів та тривалість термінів використання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі сенсорної та напівпровідникової електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка у відповідності з держбюджетними темами:

- “Дослідження фізичних процесів взаємодії та агрегатизації структурних і радіаційних дефектів в широкозонних матеріалах сенсорної електроніки” (номер державної реєстрації: 0106U001318);

- “Ефект малих доз радіації в напівпровідникових матеріалах та стабілізація параметрів кремнієвих сенсорів температури” (номер державної реєстрації №0109U002081);

- “Дослідження дії механічних, магнітних та іонізуючих полів на властивості широкозонних напівпровідникових кристалів та поверхнево-бар’єрних структур” (номер державної реєстрації №0110U001381).

- “Створення високоякісних електронних вимірювачів температури з напівпровідниковими термосенсорами на базі кремнієвих р-п-переходів” (номер державної реєстрації №0113U001249).

Метою роботи є дослідження та встановлення закономірностей змін основних електрофізичних характеристик кремнієвих транзисторних термосенсорів за дії радіаційного випромінювання, температури і релаксаційних процесів, а також розробка рекомендацій щодо підвищення їхньої радіаційної стійкості.

У процесі виконання роботи розв’язувались наступні **завдання**:

- вивчення електрофізичних характеристик досліджуваних транзисторних структур;

- дослідження впливу Х-випромінювання на зміну електрофізичних характеристик транзисторних сенсорів температури;

- дослідження впливу релаксаційних процесів та термічного відпалу на зміну електрофізичних характеристик р-п-структур ;

- підвищення радіаційної стійкості транзисторних термосенсорів.

Об’єкт дослідження – кремнієві високочастотні транзистори 2Т363А і КТ3117, виготовлені за епітаксійно-планарною технологією. Як сенсор температури використовували окремо взятий р-п-перехід емітер-база, із закороченим на базу колектором.

Предмет дослідження – зміни електрофізичних характеристик кремнієвих транзисторних структур за дії зовнішніх чинників (радіація, температура, прикладене електричне поле).

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в роботі мети використано наступні методи дослідження:

- аналіз вольт-амперних характеристик кремнієвих транзисторних сенсорів температури;

- аналіз вольт-фарадних характеристик транзисторних структур;

- аналіз вольт-температурних характеристик кремнієвих транзисторних термосенсорів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в отриманні та узагальненні нових наукових результатів:

- вперше проведені комплексні дослідження впливу X-випромінювання на характеристики транзисторних термосенсорів показали, що поверхнева складова радіаційно-стимульованих змін домінує над об'ємною на початковій стадії опромінення;

- показано, що радіаційно-стимульовані процеси у приповерхневих контактних шарах відбуваються за малих поглинутих доз, коли домінуючими є процеси радіаційно-стимульованого “заліковування” наявних структурних дефектів в області р-n-переходу;

- вперше показано, що наявність вбудованого і прикладеного електричного полів сприяє просторовому розділенню носіїв заряду і більш повільному виходу на насичення величини заряду в області контакту напівпровідників;

- запропоновано спосіб підвищення радіаційної стійкості транзисторних термосенсорів, який базується на попередньому низькодозному їхньому опроміненні з подальшим термічним відпалом і часовою релаксацією за відповідною програмою.

Практичне значення результатів роботи.

- Представлено вимоги, яким повинні відповідати транзисторні структури для їхнього використання у термометрії.

- Фізичні механізми радіаційно-стимульованої перебудови дефектної структури перехідного шару р-n-структур можуть бути використані для прогнозування показів термосенсорів у полі дії радіації.

- Запропонована модель підвищення радіаційної стійкості кремнієвих транзисторних сенсорів температури може бути ефективно використана для покращення властивостей таких датчиків.

Особистий внесок здобувача. Постановка завдання дисертаційної роботи формулювалась за безпосередньої участі дисертанта. Автор роботи брав участь у дослідженнях на всіх етапах роботи. Основна частина експериментальних досліджень виконана здобувачем особисто. Отримані результати представлені та опубліковані у співавторстві [1-31]. Дисертантом особисто були відібрані експериментальні зразки, проведені дослідження (вимірювання та опрацювання) електрофізичних характеристик р-n-структур [1, 5, 8-10, 13, 14, 20-31]. Запропоновано фізичну модель радіаційно-стимульованої перебудови дефектного стану перехідного шару кремнієвих р-n-структур [31]. Також запропоновано модель підвищення радіаційної стійкості кремнієвих транзисторних сенсорів температури [30]. Автор брав активну участь в обговоренні та інтерпретації експериментальних результатів [2-4, 6, 7, 11, 12, 15-19, 24], а також у написанні наукових статей та доповідей на всеукраїнські та міжнародні конференції.

Результати, що представлені та опубліковані у співавторстві, отримані за безпосередньої участі автора на всіх етапах роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались здобувачем особисто на наукових конференціях факультету електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика” (Львів, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014); 4-ій, 5-ій, 6-ій Міжнародних науково-технічних конференціях “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (Одеса, 2010, 2012, 2014); V Міжнародній науково-практичній конференції студентів і аспірантів “Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень” (Луцьк, 2011); 12-ій Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок і наноструктур (Івано-Франківськ, 2009); 4-ій, 5-ій Українських наукових конференціях з фізики напівпровідників “УНКФН” (Запоріжжя, 2009; Ужгород, 2011); II Всеукраїнській науково-практичній конференції “Проблеми електроніки та інформаційні технології” (Чинадієво, 2010); XXII Международной научной конференции “Релаксационные явления в твердых телах” (Воронеж, 2010); IX, X Международных конференциях VIII, IX Школах молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе “КРЕМНИЙ-2012”, “КРЕМНИЙ-2014” (Россия, Санкт-Петербург, 2012, 2014); 6-ій Українсько-польській науково-практичній конференції “Електроніка та інформаційні технології” (Львів-Чинадієво, 2014).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 31 працях, у тому числі 10 статтях у міжнародних та вітчизняних реферованих журналах, 19 тезах доповідей на наукових конференціях та 2 патентах на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків та списку використаних джерел. Дисертаційна робота викладена на 124 сторінках, містить 34 рисунки, 4 таблиці та список використаних джерел із 124 посилання.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і завдання досліджень, представлено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Відзначено особистий внесок здобувача, апробацію наукових результатів, публікацій, структуру і обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** подано огляд наукової літератури за темою дисертаційної роботи. В ньому представлені сучасні методи напівпровідникової термометрії. Зокрема, акцентовано увагу на діодних та транзисторних сенсорах температури. Описані вимоги, яким повинні відповідати транзисторні структури для їхнього використання у термометрії. Зроблено аналітичний огляд результатів досліджень впливу іонізаційного випромінювання на стабільність параметрів діодних і транзисторних сенсорів температури.

У другому розділі представлено експериментальні зразки та методи їхнього дослідження. Для досліджень використовували високочастотні транзистори 2Т363А та КТ3117. I-ий тип транзисторів (2Т363А): досліджували вплив Х-променів на основні електрофізичні характеристики окремих р-п-переходів (емітер-база та колектор-база). II-ий тип транзисторів (КТ3117): досліджували зміни основних електрофізичних характеристик переходу емітер-база за різних режимів опромінення (“активного” та “пасивного”). Описано експериментальні установки і методики розрахунку електрофізичних параметрів з ВАХ та ВФХ.

У третьому розділі подано експериментальні результати дослідження змін ВАХ транзисторних термосенсорів за дії Х-опромінення. Показано, що під впливом радіації в напівпровідниках та, відповідно, в пристроях на їхній основі протікає низка конкуруючих процесів. Основними з яких є: генерація радіаційних дефектів, утворення електрон-діркових пар, впорядкування структурних дефектів, тощо. Залежно від початкового дефектного стану структури на початковій стадії опромінення домінує один з цих процесів. Так, на початковій стадії опромінення ($D < 195$ Гр) у транзисторних термосенсорах 2Т363А відбувається незначне зменшення величини дифузійної та рекомбінаційної компонент повного струму через емітерний р-п-перехід (рис. 1), що зумовлено перезарядкою поверхневих станів на границі поділу двох напівпровідників. Подальше збільшення величини поглинутої дози опромінення призводить до зростання струму через емітерний р-п-перехід, що зумовлено домінуванням процесу радіаційно-стимульованої перебудови та впорядкування дефектної структури приповерхневих шарів р-п-переходу (ефект “малих доз”).

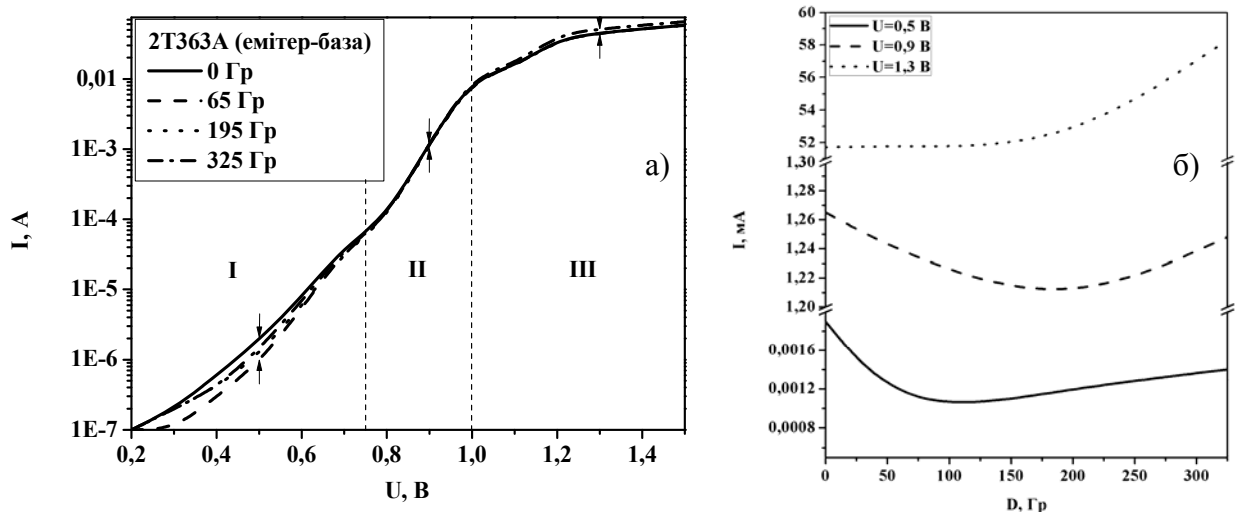


Рис. 1. Радіаційно-стимульовані зміни вольт-амперної характеристики (а) та окремих її ділянок (б) емітерного переходу транзистора 2Т363А

Аналогічні залежності отримані і для колекторного р-п-переходу. Показано, що радіаційно-стимульовані зміни величини струму через колекторний перехід є протилежними до відповідних змін величини струму через емітерний перехід.

З отриманих ВАХ розраховано ряд електрофізичних параметрів (табл. 1).

Таблиця 1. Зміни електрофізичних параметрів емітерного переходу, стимульовані Х-променями

Параметри	0 Гр	65 Гр	195 Гр	325 Гр
$S, A/B$	0,069	0,069	0,070	0,072
$R_{ен}, Ом$	14,15	14,41	14,22	13,95
n	2,14	2,15	2,15	2,14
$U_{відс}, В$	1,06	1,06	1,06	1,06
$E_{бар}, eВ$	0,631	0,634	0,628	0,629

На рис. 2 представлені радіаційно-стимульовані зміни емітерного переходу транзисторних термосенсорів КТ3117 за “пасивного” (а) та “активного” (б) режимів опромінення.

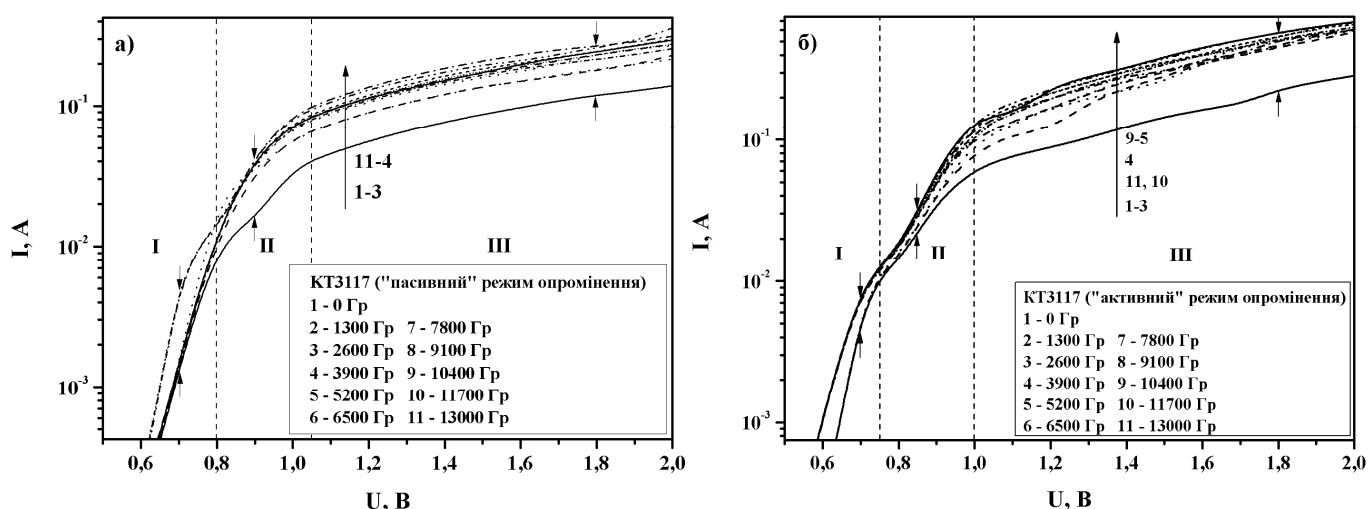


Рис. 2. Радіаційно-стимульовані зміни вольт-амперної характеристики емітерного переходу транзистора КТ3117 за “пасивного” (а) і “активного” (б) режимів опромінення

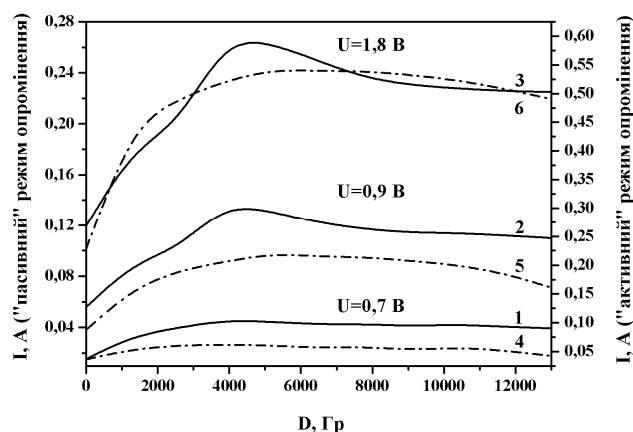


Рис. 3. Радіаційно-стимульовані зміни величини струму окремих ділянок ВАХ емітерного переходу транзистора КТ3117. Криві 1, 2, 3 – “пасивний” режим опромінення; криві 4, 5, 6 – “активний” режим опромінення

Для більш детального аналізу радіаційно-стимульованих змін кожної з компонент повного струму через р-п-перехід побудовані залежності $I = f(D)$, які зображені на рис. 3. Показано, що на початковій стадії опромінення ($D < 4000$ Гр для “пасивного” режиму опромінення і $D < 5200$ Гр для “активного”) величини струмів на трьох ділянках ВАХ збільшуються із збільшення поглинутої дози опромінення. Ці зміни зумовлені

“ефектом малих доз” – заліковуванням структурних дефектів у приповерхневих шарах емітерного переходу сенсора. За подальшого збільшення величини дози опромінення починають домінувати процеси генерації дефектів, які, як відомо, є ефективними рекомбінаційними центрами. А це приводить до зменшення концентрації носіїв заряду і величини прямого струму через р-п-перехід та виходу його на насичення. Відмінність у величинах доз, за яких струм через р-п-перехід набуває максимального значення за “активного” і “пасивного” режимів опромінення, зумовлена, на нашу думку, просторовим розділенням прикладеним електричним полем електрон-діркових пар за “активного” режиму опромінення.

У четвертому розділі представлені експериментальні результати досліджень радіаційно-стимульованих змін ємнісних характеристик транзисторних термосенсорів 2Т363А і КТ3117. Особливістю ВФХ досліджуваних термосенсорів є наявність характерного максимуму $C_{\max 1}$ (рис. 4), що свідчить про накопичення додатного заряду в області перехідного шару р-п-переходу. Для аналізу радіаційно-

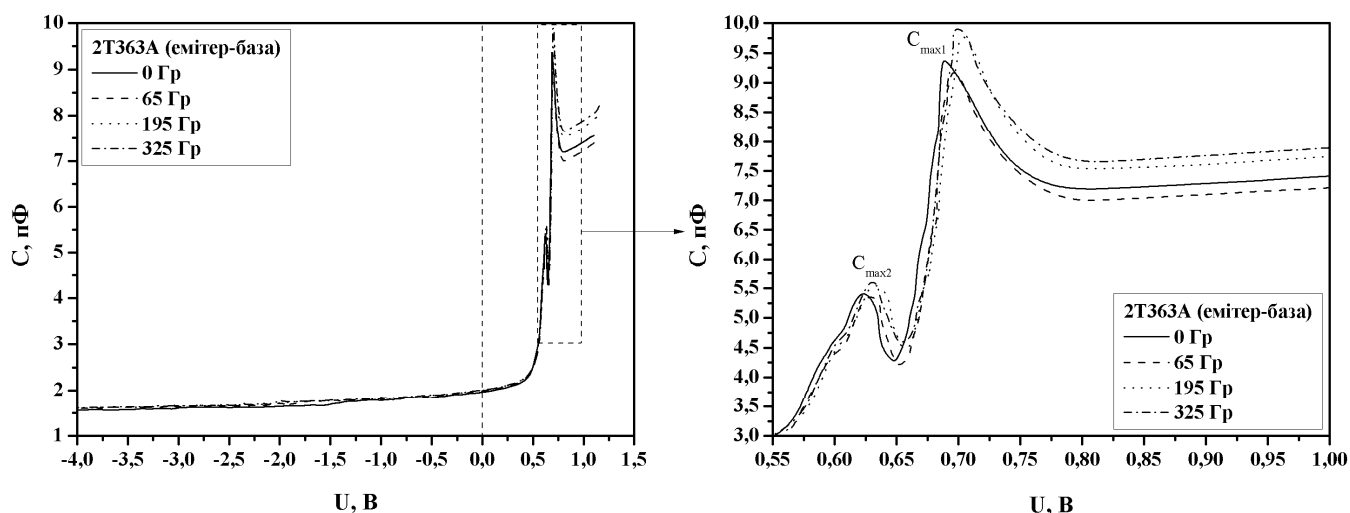


Рис. 4. Радіаційно-стимульовані зміни вольт-фарадної характеристики емітерного переходу транзистора 2Т363А

стимульованих змін амплітудного значення ємності цього максимуму, а також його положення на осі напруг побудовані залежності, що представлені на рис. 5.

Амплітудне значення ємності характерного максимуму $C_{\max 1}$ з дозою опромінення спочатку ($D \leq 65$ Гр) зменшується (рис. 5а), що свідчить про зменшення величини додатного заряду, локалізованого в перехідному шарі р-п-переходу. Такий характер змін може бути зумовлений рекомбінацією з електронами, що генеруються радіацією, а також, генераційно-рекомбінаційними процесами на межі контакту двох напівпровідників за участю поверхневих станів. Подальше збільшення величини поглинутої дози призводить до зростання амплітудного значення ємності характерного максимуму (рис. 5а), що свідчить про домінування процесу генерації радіаційних дефектів над їхньою рекомбінацією і, як наслідок, до накопичення додатного заряду в перехідному шарі. При цьому також відбувається зміщення характерного максимуму $C_{\max 1}$ в область більших додатних напруг

(рис. 5б), тобто зміна кута нахилу висхідної лінійної ділянки ВФХ, що може свідчити про відносно невелике збільшення густини поверхневих станів в діапазоні поглинутих доз $0 - 195$ Гр.

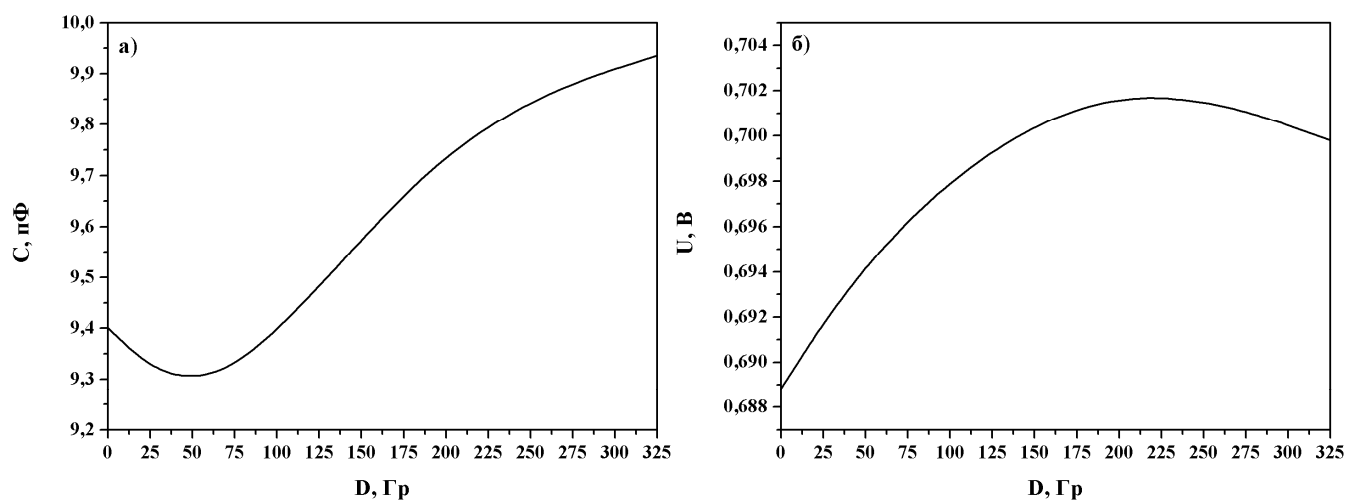


Рис. 5. Радіаційно-стимульовані зміни величини ємності характерного максимуму C_{max1} (а) та його зміщення по осі напруг (б)

Аналогічні дослідження проведені на транзисторних термосенсорах КТ3117 за “пасивного” і “активного” режимів опромінення (рис. 6).

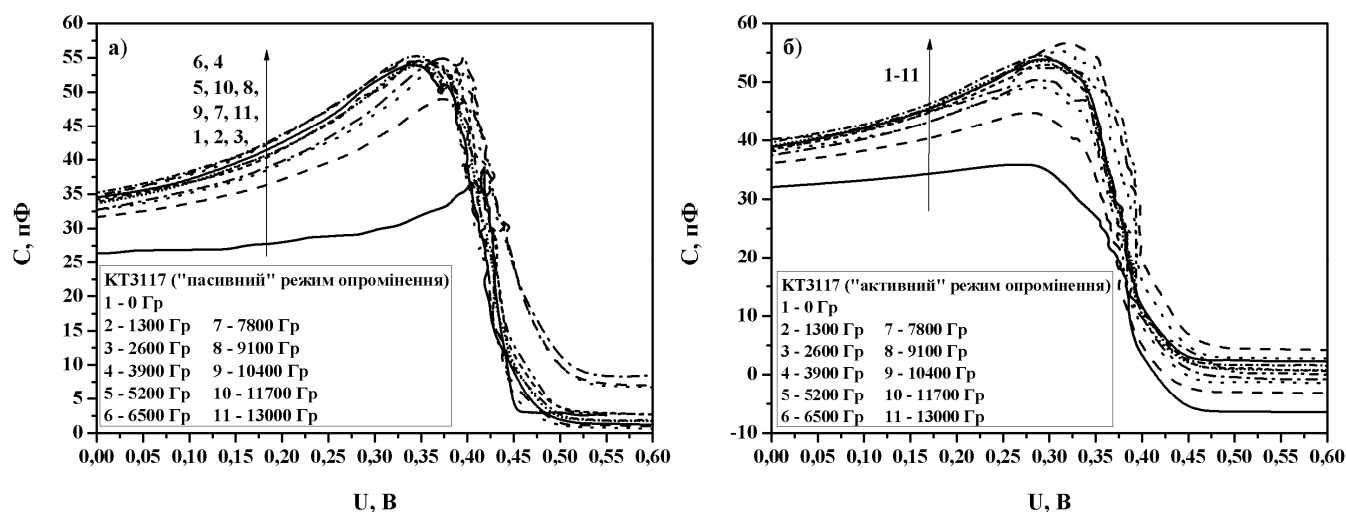


Рис. 6. Радіаційно-стимульовані зміни вольт-фарадної характеристики емітерного переходу транзистора КТ3117 в діапазоні напруг $0-0,6$ В: а) – “пасивний” режим опромінення; б) – “активний” режим опромінення

Характер радіаційно-стимульованих змін амплітудного значення ємності максимуму на ВФХ є подібний, проте не однаковий, для обох режимів опромінення. Амплітудне значення ємності характерного максимуму у випадку “активного” режиму опромінення виходить на насичення за величини поглинутої дози $D \approx 10000$ Гр, тоді як за “пасивного” режиму опромінення вихід на насичення спостерігається за дози $D \approx 4000$ Гр. Збільшення величини поглинутої дози

опромінення у 2,5 рази для виходу на насичення величини ємності характерного максимуму на ВФХ за “активного” режиму опромінення порівняно з “пасивним” режимом опромінення (рис. 7) зумовлені тим, що прикладене до р-n-переходу електричне поле в процесі опромінення стимулює просторове розділення генерованих електрон-діркових пар та збільшення швидкості відтоку електронів в об’єм напівпровідника. Це значно зменшує ймовірність їхньої анігіляції і, як

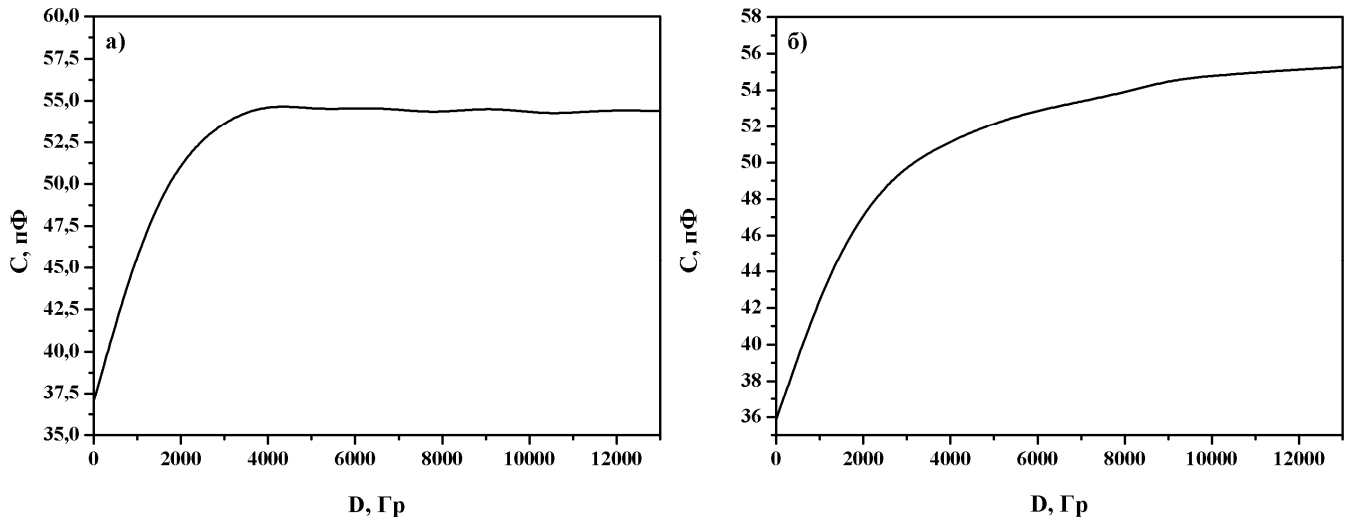


Рис. 7. Радіаційно-стимульовані зміни величини ємності характерного максимуму: а) – “пасивний” режим опромінення; б) – “активний” режим опромінення

наслідок, більш пологий вихід на насичення. За “пасивного” режиму опромінення характерний максимум зміщується в сторону менших прикладених напруг, а за “активного” режиму опромінення – в протилежному напрямку, в сторону більших напруг. Зміщення максимуму по осі напруг свідчить про зміну кута нахилу висхідної ділянки ВФХ в області малих прямих прикладених зміщень, тобто про зміну густини поверхневих станів.

Вихід на насичення амплітудного значення ємності характерного максимуму із збільшенням дози опромінення свідчить про накопичення додатного заряду на обмеженому числі пасток в перехідному шарі.

Вважається, що дірки, які утворюються в перехідному шарі за дії іонізуючого випромінювання, захоплюються на нейтральні пастки, що містять водень TH^0 , де T – дефект структури типу $\text{O}_3 \equiv \text{Si} \bullet$ (знак \equiv означає насичені хімічні зв’язки кремнію з трьома атомами кисню, знак \bullet означає ненасичений обірваний зв’язок кремнію). При цьому, якщо енергія дірки менша за енергію зв’язку Si-H^0 , то відбувається захоплення дірки, і пастка, що містить водень, заряджається, утворюючи додатний об’ємний заряд:



де k_1 – константа швидкості реакції (1).

Якщо, енергія дірки є більшою, ніж енергія зв'язку Si-H^0 , тоді захоплення дірки стимулює розрив водневого зв'язку та утворення вільного позитивного іону водню (протона), як в моделі МакЛіна:



де k_2 – константа швидкості реакції (2).

Позитивно заряджений дефект TH^+ може бути кулонівським центром захоплення електронів, які утворюються разом із дірками за дії іонізуючого випромінювання. Коли захоплюється електрон – дефект нейтралізується:



де k_3 – константа швидкості реакції (3).

Вільна пастка T^0 може одночасно бути і дірковою пасткою:



де k_4 – константа швидкості реакції (4).

Позитивний іон водню може бути захопленим назад на вільну водневу пастку:



де k_5 – константа швидкості реакції (5).

Іони водню дифундують і дрейфують в електричному полі до перехідного шару контакту двох напівпровідників, де взаємодіють з пасивованими поверхневими станами і приводять до їхньої депасивації.

П'ятий розділ присвячений дослідженню радіаційно-стимульованих змін температурних залежностей транзисторних термосенсорів та підвищенню їхньої радіаційної стійкості. На рис. 8 представлені зміни температурних характеристик емітерних переходів транзисторних термосенсорів 2Т363А і КТ3117, зумовлені дією радіації. Як видно з рисунку, температурні залежності обох транзисторів є лінійними. Чутливість транзисторного термосенсора 2Т363А до опромінення становить 1,92 мВ/°С, а КТ3117 – 2,65 мВ/°С.

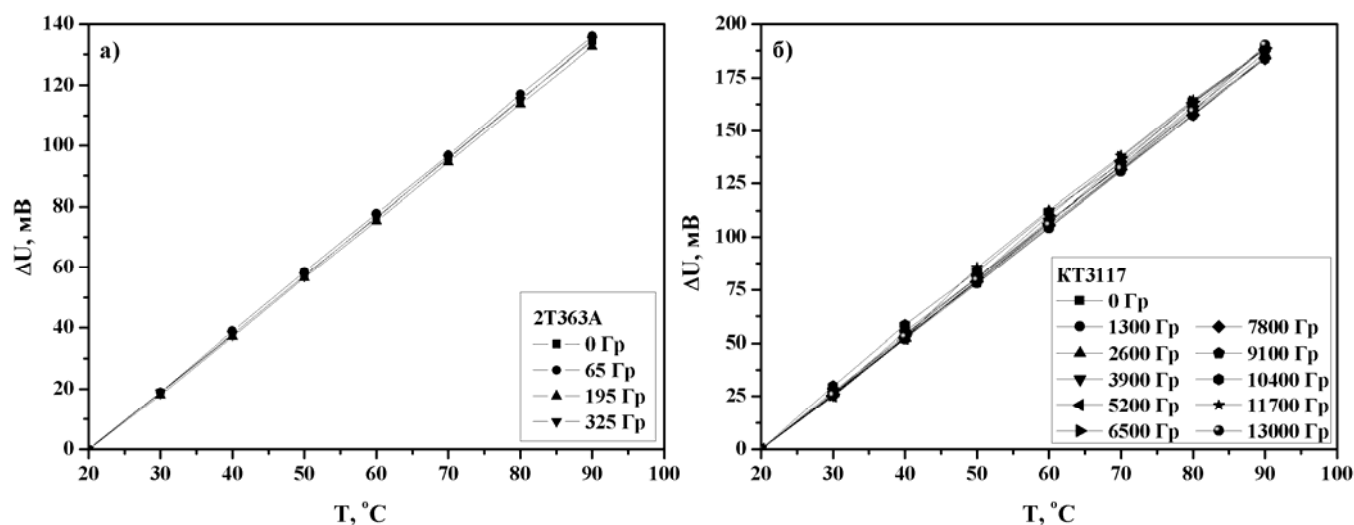


Рис. 8. Радіаційно-стимульовані зміни температурних залежностей емітерних переходів транзисторних термосенсорів 2Т363А (а) і КТ3117 (б)

Зміна чутливості термосенсорів у досліджуваному діапазоні поглинутих доз не перевищує 2%.

Зменшення U_{pn} за дії радіації зумовлена, в основному, зменшенням концентрації основних носіїв заряду в базовій області, що і приводить до незначного зменшення термочутливості емітерного р-п-переходу термосенсора.

Термічний відпал опромінених термосенсорів показав, що відновлення U_{pn} відбувається за температур $T \geq 410 - 420 K$, що може бути зумовлене відпалом наявних і частково генерованих радіацією E -центрів.

Аналіз попередньо отриманих результатів досліджень радіаційно-стимульованих змін ВАХ і ВФХ транзисторних термосенсорів дозволив нам запропонувати метод підвищення їхньої радіаційної стійкості з використанням процедури їхнього попереднього низькодозного Х-опромінення і відпалу.

Після першого опромінення радіаційно-стимульовані зміни компонент ВАХ на початковій стадії характеризуються відповідним кутом нахилу в діапазоні поглинутих доз $0 - 4000$ Гр (рис. 3). Цей кут нахилу характеризує швидкість протікання радіаційно-стимульованих процесів, які приводять до відповідних змін величини струму через р-п-перехід. Такими процесами можуть бути:

- “заліковування” наявних структурних дефектів (ефект “малих доз”) у приповерхневих шарах контактної області двох напівпровідників;
- дисоціація комплексів структурних дефектів, в результаті чого утворюються комплекси, які можуть пасивувати наявні поверхневі стани;
- радіаційно-стимульоване збільшення коефіцієнта дифузії міжвузлових атомів.

Після досягнення області насичення на відповідних залежностях $I = f(D)$ термосенсори піддавалися часовій релаксації за кімнатної температури тривалістю 96 годин. Після цього проводили термічний відпал експериментальних зразків за $T = 410 K$ протягом двох годин.

На рис. 9 показані закономірності радіаційно-стимульованих змін кута нахилу залежності $I = f(D)$ на початкових стадіях опромінення ($D \leq 4000$ Гр) для “пасивного” (а) і “активного” (б) режимів опромінення.

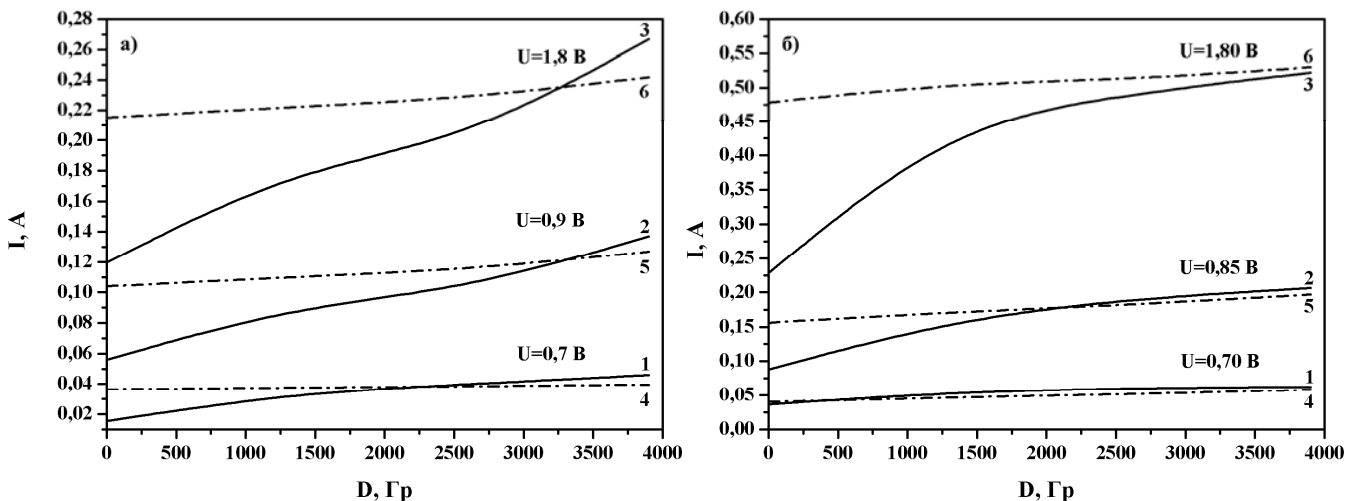


Рис. 9. Радіаційно-стимульовані зміни величини струму окремих ділянок ВАХ емітерного переходу транзистора КТ3117 за “пасивного” (а) і “активного” (б) режимів опромінення. Криві 1, 2, 3 – перша стадія опромінення; криві 4, 5, 6 – опромінення після релаксації та відпалу

Як видно з рисунків кут нахилу кривої $I = f(D)$, який характеризує швидкість радіаційно-стимульованих змін величини струму через р-п-перехід, у випадку першої стадії опромінення (криві 1, 2, 3) є значно більшим, за відповідне значення кута нахилу після релаксації та термічного відпалу (криві 4, 5, 6).

Аналіз отриманих результатів дозволяє відзначити позитивний ефект попереднього опромінення транзисторних структур. Таке опромінення з подальшим термічним відпалом призводить до формування стоків для дефектів, а також їх кластерів, до складу яких входять вакансії домішкові та міжвузлові атоми. Ці стоки можуть бути комплексами радіаційних і структурних дефектів з нейтральними домішками такими як С, О, Н, які завжди присутні в кремнієвих структурах. Розміри кластерів можуть бути співмірними і більшими за робочу область тонкої бази транзистора. В такому випадку навколо кластерів локалізується просторовий заряд, який, у свою чергу, формує високий потенціальний бар'єр, величина якого співмірна з величиною бар'єру р-п-переходу.

Висновки, які формулюються в даній роботі, також ґрунтуються на наших попередніх дослідженнях, які показали, що в полі дії радіації коефіцієнт дифузії міжвузлового атому кремнію може збільшуватись на порядок. Тобто має місце радіаційно-стимульована дифузія компонент, яка супроводжується "заліковуванням" наявних структурних дефектів (ефект "малих доз").

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вперше проведені комплексні дослідження впливу Х-випромінювання на характеристики транзисторних термосенсорів показали, що поверхнева складова радіаційно-стимульованих змін домінує над об'ємною на початковій стадії опромінення.

2. Показано, що під впливом радіації в напівпровідниках та, відповідно, в пристроях на їхній основі, протікає низка конкуруючих процесів. Основними з яких є: генерація радіаційних дефектів, перезарядка поверхневих станів, утворення електрон-діркових пар, впорядкування структурних дефектів, тощо. Залежно від початкового дефектного стану структури на початковій стадії Х-опромінення домінує один з цих процесів.

3. Встановлено, що за збільшення величини поглинутої дози опромінення ($D > 195$ Гр) в транзисторах 2Т363А відбувається зростання струму через емітерний р-п-перехід, що зумовлено домінуванням процесу радіаційно-стимульованої перебудови та впорядкування дефектної структури приповерхневих шарів р-п-переходу (ефект "малих доз").

4. Показано, що вихід на насичення величини радіаційно-стимульованих змін амплітуди характерного максимуму на ВФХ транзисторних термосенсорів КТ3117 ($D \approx 10000$ Гр за "активного" режиму опромінення, $D \approx 4000$ Гр за "пасивного") зумовлений просторовим розділенням прикладеним зовнішнім електричним полем електрон-діркових пар, що генеруються радіацією.

5. На початковій стадії опромінення ($D < 4000$ Гр) в транзисторних термосенсорах КТ3117 домінуючими є процеси, пов'язані із "заліковуванням"

наявних структурних дефектів (ефект “малих доз”) у приповерхневому шарі контактної області, що зумовлено збільшенням коефіцієнту дифузії міжвузлових атомів в полі дії радіації.

6. Встановлено, що емітерний перехід є більш стабільний в полі дії радіації, і тому як сенсор температури доцільно використовувати саме цей перехід. Радіаційно-стимульовані зміни температурних характеристик транзисторних термосенсорів в діапазоні поглинутих доз $D < 13000$ Гр не перевищують 2%.

7. Попереднє низькодозне ($D \approx 4000$ Гр) опромінення досліджуваних термосенсорів з подальшим термічним відпалом ($T = 410$ К, $t = 120$ хв) і часовою релаксацією ($t = 96$ год) дозволили розробити спосіб підвищення їхньої радіаційної стійкості (захищено патентом).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вплив магнітного та рентгенівського полів на електрофізичні властивості сенсорів температури / Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Р. М. Лис [та ін.] // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2009. – № 4. – С. 34–37.

2. Перебудова дефектів в поверхнево-бар’єрних структурах Bi-Si-Al стимульована дією радіації / Б. В. Павлик, Р. М. Лис, А. С. Грипа [та ін.] // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2010. – Т. 1, №7. – С. 37–41.

3. Radiation-induced rearrangement of defects in silicon crystals / B. V. Pavlyk, R. M. Lys, A. S. Hrypa [et. al.] // Ukr. J. Phys. – 2011. – Vol. 56, №1. – P. 65–69.

4. Особливості електрофізичних характеристик поверхнево-бар’єрних структур на базі кристалів p-Si / Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Р. М. Лис [та ін.] // ФХТТ. – 2009. – Т. 10, №4. – С. 935–938.

5. Pavlyk B. The investigation of the influence of X-ray irradiation and weak magnetic field on the parameters stability of transistor temperature sensors / B. Pavlyk, A. Lenovenko, A. Hrypa // PCSS. – Vol. 13, №3. – 2012. – P. 802–807.

6. Радіаційно-індуковані характеристики поверхнево-бар’єрних структур Bi-Si-Al / Б. В. Павлик, Д. П. Слободзян, А. С. Грипа [та ін.] // Сборник научных трудов SWorld. – 2012. – Т. 4, №4. – С. 83–90.

7. Quality of the p-Si crystal surface and radiation-stimulated changes in the characteristics of Bi-Si-Al surface-barrier structures / B. V. Pavlyk, A. S. Hrypa, D. P. Slobodzyan [et. al.] // Semiconductors. – 2012. – Vol. 46, №8. – P. 993–997.

8. Павлик Б. В. Дослідження стабільності параметрів транзисторних термосенсорів під дією рентгенівського опромінення та магнітного поля / Б. В. Павлик, А. М. Леновенко, А. С. Грипа // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2013. – Т. 10, №2. – С. 94–101.

9. Павлык Б. В. Радиационно-стимулированные процессы в транзисторных термосенсорах / Б. В. Павлык, А. С. Грыпа // ФТП. – 2016. – № 5. – С. 689.

10. Вибір робочої точки напівпровідникового сенсора температури / Б. Павлик, А. Грипа, Й. Шикоряк, М. Кушлик [та ін.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2014. – Вип. 4. – С. 88–94.

11. Особливості характеристик опромінених поверхнево-бар'єрних структур Bi-Si / Б. В. Павлик, Д. П. Слободзян, А. С. Грипа [та ін.] // XII Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок і наноструктур: 18–23 травня 2009 р.: тези доповідей. – Івано-Франківськ, 2009. – Т. 2. – С. 348 – 349.

12. Вплив магнітного та радіаційного полів на електромеханічні властивості кристалів p-Si / Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Д. П. Слободзян [та ін.] // УНКФН–4: IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників: 16–20 вересня 2009р.: тези доповідей. – Запоріжжя, 2009. – Т. 1. – С. 215.

13. Грипа А. С. Вплив малих доз радіації на параметри транзисторних сенсорів температури на базі Si / А. С. Грипа // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2010: 19–21 травня 2010 р.: тези доповідей. – Львів, 2010. – С. А11.

14. Грипа А. С. Вплив рентгенівського опромінення на параметри транзисторних сенсорів температури на базі Si / А. С. Грипа, Б. В. Павлик, А. М. Леновенко // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ–4): 4–та міжнародна науково-технічна конференція: 28 червня–2 липня 2010 р.: тези доповідей. – Одеса, 2010. – С. 148.

15. Перебудова дефектів в поверхнево-бар'єрних структурах Bi-Si-Al стимульована дією радіації / Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Д. П. Слободзян [та ін.] // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ–4) : 4–та міжнародна науково-технічна конференція: 28 червня–2 липня 2010 р.: тези доповідей. – Одеса, 2010. – С. 46.

16. Грипа А. С. Особливості технології формування бар'єрних структур на базі p-Si / А. С. Грипа // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2009: 20–22 травня 2009 р.: тези доповідей. – Львів, 2009. – С. А11.

17. Дослідження дефектної структури приповерхневого шару кристалів p-Si за допомогою оптичної, електронної та атомно-силової мікроскопії / Б. В. Павлик, Р. І. Дідик, А. С. Грипа [та ін.] // Проблеми електроніки та інформаційні технології: II всеукраїнська науково-практична конференція: 2–5 вересня 2010 р.: тези доповідей. – Чинадієво, 2010. – С. F11.

18. Вплив дефектного стану поверхні кристалів кремнію на характеристики поверхнево-бар'єрних структур / Б. В. Павлик, Д. П. Слободзян, А. С. Грипа [та ін.] // УНКФН–5: V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників: 9–15 жовтня 2011р.: тези доповідей. – Ужгород, 2011. – С. 135 – 136.

19. Эволюция дефектов в поверхностно-барьерных структурах Bi-Si-Al / Б. В. Павлык, Д. П. Слободзян, А. С. Грипа [и др.] // КРЕМНИЙ–2012: IX Международная конференция и VIII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе: 9–13 июля 2012г.: тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2012. – С.199.

20. Грипа А. С. Вплив магнітного та рентгенівського полів на електрофізичні властивості сенсорів температури / А. С. Грипа // Міжнародна конференція

студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2011: 18–20 травня 2011 р.: тези доповідей. – Львів, 2011. – С. А4.

21. Грипа А. С. Вплив магнітного та рентгенівського полів на електрофізичні властивості сенсорів температури / А. С. Грипа // V міжнародна науково-практична конференція студентів і аспірантів «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень»: 10–11 травня 2011 р.: тези доповідей. – Луцьк, 2011. – С. 152.

22. Грипа А. С. Дослідження впливу рентгенівського опромінення та магнітного поля на стабільність параметрів транзисторних термосенсорів / А. С. Грипа // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2012: 19–22 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Львів, 2012. – С. D83.

23. Грипа А. С. Дослідження параметрів транзисторних термосенсорів під дією рентгенівського опромінення та магнітного поля / А. С. Грипа, Б. В. Павлик, А. М. Леновенко // V Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ–5): 4–8 червня 2012 р.: тези доповідей. – Одеса, 2012. – С. 188.

24. Радіаційно-індуковані зміни характеристик поверхнево-бар’єрних структур Bi-Si-Al / Павлик Б. В., Слободзян Д. П., Грипа А. С. [та ін.] // Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті 2012»: 18–27 грудня 2012 р.: тези доповідей. – <http://www.sworld.com.ua>.

25. Грипа А. С. Вплив рентгенівського випромінювання на електрофізичні параметри транзисторних сенсорів температури / А. С. Грипа // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2013: 15–17 травня 2013 р.: тези доповідей. – Львів, 2013. – С. С11.

26. Грипа А. С. Вплив рентгенівського випромінювання на параметри сенсорів температури на основі кремнієвих транзисторних р-п-переходів / А. С. Грипа, Б. В. Павлик, О. В. Осадчук // 6-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології”: 29 вересня–3 жовтня 2014 р.: тези доповідей. – Одеса, 2014. – С. 68.

27. Hrypa A. Radiation-stimulated processes in transistor thermosensors. A. Hrypa, O. Stashyshyn, O. Kravets // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА–2014: 15–17 травня 2014р.: тези доповідей. – Львів, 2014. – С. 82.

28. Моделювання впливу радіації на характеристики термосенсорів / Б. Павлик, А. Грипа, О. Кравець, Я. Шмигельський // 6-та Україно-польська науково-практична конференція “Електроніка та інформаційні технології” (ЕлІТ–2014): 28–31 серпня 2014р.: тези доповідей. – Львів–Чинадієво, 2014. – С. 240.

29. Павлык Б. В. Влияние рентгеновского излучения на параметры сенсоров температуры на основе кремниевых транзисторных р-п-переходов / Б. В. Павлык, А. С. Грипа // X Международная конференция и IX Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе

(КРЕМНИЙ–2014): 7–12 июля 2014г.: тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 199.

30. Павлик Б. В. Заявка на патент 102378 Україна, МПК H01L21/02. Спосіб радіаційної обробки транзисторних сенсорів температури / Б. В. Павлик, Р. І. Дідик, А. С. Грипа [та ін.]; заявник і власник Львівський національний університет імені Івана Франка. – № u201513115; заявл. 30.12.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл №20

31. Павлик Б. В. Патент на корисну модель 102378 Україна, МПК H01L21/428, H01L31/115. Спосіб обробки напівпровідникових матеріалів / Б. В. Павлик, Р. І. Дідик, Й. А. Шикоряк [та ін.]; заявник і власник Львівський національний університет імені Івана Франка. – № u201513115; заявл. 30.12.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл №20.

АНОТАЦІЯ

Грипа А. С. Радіаційно-стимульовані процеси в кремнієвих транзисторних термосенсорах. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2016.

Робота присвячена дослідженню та встановленню закономірностей змін основних електрофізичних характеристик кремнієвих транзисторних термосенсорів за дії радіаційного випромінювання, температури і релаксаційних процесів, а також розробці рекомендацій щодо підвищення їхньої радіаційної стійкості.

Представлено вимоги, яким повинні відповідати транзисторні структури для їхнього використання у термометрії.

Показано, що на початковій стадії опромінення поверхнева складова радіаційно-стимульованих змін домінує над об'ємною, коли переважаючими є процеси радіаційно-стимульованого “заліковування” наявних структурних дефектів в області р-п-переходу.

Показано, що наявність вбудованого і прикладеного електричних полів сприяє просторовому розділенню носіїв заряду і більш повільному виходу на насичення його величини в області контакту напівпровідників.

Запропоновано спосіб підвищення радіаційної стійкості транзисторних термосенсорів, який базується на попередньому низькодозному їхньому опроміненні з подальшим термічним відпалом і часовою релаксацією за відповідною програмою.

Ключові слова: кремній, транзистор, р-п-перехід, сенсор температури, Х-випромінювання, перебудова дефектів, радіаційна стійкість.

АННОТАЦИЯ

Грыпа А. С. Радиационно-стимулированные процессы в кремниевых транзисторных термосенсорах. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков. - Львовский национальный университет имени Ивана Франко, Львов, 2016.

Работа посвящена исследованию и установлению закономерностей изменения основных электрофизических характеристик кремниевых транзисторных термосенсоров под действием радиационного излучения, температуры и релаксационных процессов, а также разработке рекомендаций по повышению их радиационной стойкости.

Представлены требования, которым должны соответствовать транзисторные структуры для их использования в термометрии.

Показано, что на начальной стадии облучения поверхностная составляющая радиационно-стимулированных изменений доминирует над объемной, когда преобладающими являются процессы радиационно-стимулированного "залечивания" имеющихся структурных дефектов в области р-п-перехода.

Показано, что наличие встроенного и приложенного электрических полей способствует пространственному разделению носителей заряда и более медленному выходу на насыщение его величины в области контакта полупроводников.

Предложен способ повышения радиационной стойкости транзисторных термосенсоров, который основан на предыдущем низкодозном их облучении с последующим термическим отжигом и временной релаксацией по соответствующей программе.

Ключевые слова: кремний, транзистор, р-п-переход, сенсор температуры, X-излучение, перестройка дефектов, радиационная стойкость.

ABSTRACT

Hrypa A. Radiation-stimulated processes in silicon transistor thermosensors. Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in physics and mathematics, speciality 01.04.10 - physics of semiconductors and dielectrics. - Lviv University, Lviv, 2016.

The work is devoted to the research and establishment of regularities of changes in fundamental electrophysical properties of silicon transistor thermosensors under the action of radiation, temperature and relaxation processes as well as to the development of recommendations for the improvement of their radiation resistance.

The requirements the transistor structures have to meet for their use in thermometry are presented.

It is shown that at the initial stage of irradiation a superficial component of the radiation-induced changes dominates a volumetric one when the processes of radiation-stimulated "healing" of existing structural defects in the p-n-junction are prevalent.

It is demonstrated that the built-in and the applied electric fields lead to the spatial separation of charge carriers and makes the saturation of its value in semiconductor contact slower.

A method of increasing radiation resistance of transistor thermosensors, based on their previous low-level irradiation followed by annealing and hour-long relaxation according to a particular program, has been suggested.

Keywords: silicon, transistor, p-n-junction, temperature sensor, X-rays, defects restructuring, radiation resistance increase.