

УДК 621.3.049.77:681.586:621.365.46

Є.М. КІСЕЛЬОВ, доцент, к.техн.н.
А.В. ТАРАНЕЦЬ, старший викладач

ПОБУДОВА МЕТОДИКИ СИНТЕЗУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНОГО ДАТЧИКА ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Запорізька державна інженерна академія

Запропоновано трьохрівневу методику синтезу та дослідження інтегрованих адаптивних датчиків на основі біполярного транзистора з польовим керуванням (БТПК). Побудована система адаптивного регулювання чутливості розроблених датчиків залежно від рівня потужності випромінювання шляхом зміни умов проходження електричного струму в БТПК. Визначено, що розроблені датчиків потужності випромінювань (ДПВ) характеризуються адаптивним регулюванням чутливості для варіанту включення підсистеми чутливого елемента – керуючого елемента в ланцюг затвора БТПК в межах 0,125-7,5 мА/мВт та 0,267-1 мА/Вт в ланцюг бази БТПК

Ключові слова: датчик потужності випромінювання, біполярний транзистор з польовим керуванням, адаптивність перетворення.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Перспективним для цілей вимірювань і контролю різних фізичних величин є створення нових багатошарових структур на основі комбінування існуючих приладів і методів вимірювання і контролю різних величин. Одним з сучасних напрямів розвитку сенсорної електроніки, що реалізовує таку концепцію, є MEMS – системи [1], які використовують для перетворення властивості сегнетоелектричних речовин.

Більшість сучасних датчиків потужності випромінювань (ДПВ) використовують для обробки вихідних сигналів піроелектричних перетворювачів польові транзистори з керуючим р-п переходом, що пояснюється необхідністю узгодження високого опору піроелектрика з низьким вхідним опором подальших контрольно-вимірювальних пристроїв. Для отримання оптимального посилення в таких схемах необхідне узгодження опору піроелектричного приймача з вхідним опором транзистора. Альтернативним рішенням може бути застосування транзистора з ізольованим каналом у якості первинного елемента обробки сигналу піроелектричного приймача, що дозволить одержати більш велику величину чутливості, ніж при використанні польового транзистора з р-п переходом. Біполярний транзистор з польовим керуванням (БТПК) [2], що відноситься до комбінованих твердотільних структур, має з погляду використання в схемах первинної обробки сигналів піроелектричних приймачів, такі ж високі значення вхідного опору, але при цьому передбачає можливість адаптивної настройки характеристик. Застосування БТПК в піроелектричних ДПВ дозволить потенційно набувати вищого

значення чутливості і виключити з схеми попередньої обробки сигналів піроелектричних приймачів додаткові узгоджувальні опори.

Створення ДПВ, котрі реалізують функції адаптивного настроювання робить актуальним вивчення можливості інтеграції піроелектричних перетворювачів з твердотільними напівпровідниковими приладовими структурами, до яких відноситься БТПК, попередні дослідження якого показали можливість використання цього транзистора у якості основи для інтелектуальних сенсорів. Таким чином, закономірним є подальше дослідження характеристик БТПК, ДПВ на основі БТПК і розробка методів і засобів автоматичного регулювання чутливості.

Мета і задачі дослідження

Предметом дослідження є конструкції, схеми і характеристики адаптивних датчиків потужності випромінювань, які містять піроелектричний перетворювач, сполучений із БТПК.

Метою роботи є розробка на основі комбінованих твердотільних структур інтегрованих датчиків потужності випромінювань і побудова системи адаптивного керування цими датчиками.

Поставлена мета може реалізуватися шляхом рішення наступних задач:

- дослідження характеристик керування БТПК як первинного елемента обробки вихідного сигналу піроелектричних перетворювачів;
- розробка конструкцій ДПВ, фізичної і схемотехнічної моделі датчика, методик експериментальних досліджень макетних зразків датчиків, які поєднують піроелектричний перетворювач із БТПК;
- дослідження характеристик ДПВ.

Результати досліджень

З метою розробки датчиків на основі БТПК запропонована методика синтезу конструкцій і моделей, відповідно до якої виділяється три рівні дослідження [2], які відповідають підсистемам чутливого елемента (ЧЕ) – поглинача випромінювань, керуючого елемента (КЕ) – піроелектричного перетворювача і виконавчого елемента (ВЕ) – БТПК. Доведено, що дослідження БТПК за допомогою програм схемотехнічного моделювання дозволяє мінімізувати витрати обчислювальних ресурсів, без погіршення точності отриманих результатів.

Виконано аналіз фізичних процесів у БТПК, розроблена його схемотехнічна модель (рис.1). З метою ідентифікації параметрів схемотехнічної моделі проведено фізико-топологічне моделювання БТПК за допомогою системи T-CAD Studio-4.11 [3]. Так як виконане моделювання потребує значних витрат часових і обчислювальних ресурсів, то була запропонована аналітична методика визначення параметрів елементів схеми заміщення. Адаптація моделі для пакета програм МАЭС-

П дозволила одержати і досліджувати вхідні, вихідні і передатні характеристики БТПК.

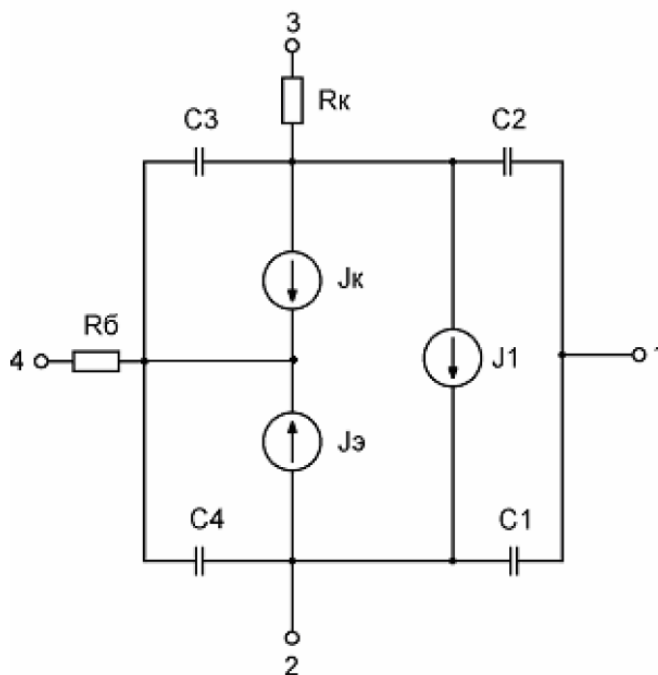


Рисунок 1 - Еквівалентна схема БТПК: 1 - польовий електрод (затвор); 2 - емітер (витік); 3 - колектор (стік); 4 - база (підкладка).

Встановлено, що вихідний струм БТПК залежить від величини струму бази і потенціалу польового електрода. При величині напруги на затворі, більшій за граничну, у базовій області утворюється провідний канал, шунтуючий біполярну частину, у результаті чого вихідний струм БТПК змінюється (рис.2) [4]. Струм підкладки (бази), що протікає паралельно струму каналу, викликає перерозподіл потенціалу підкладки, що не тільки змінює граничну напругу МОН-структури, але й величину струму колектора (стоку). У результаті цього вихідні характеристики переходять у режим насичення при великих значеннях напруги U_k і I_k , що протікає у вихідному ланцюзі, має більшу величину, ніж у класичному біполярному транзисторі. Цей механізм обумовлює можливість створення адаптивних датчиків на основі БТПК.

Проведено аналіз адекватності результатів досліджень на основі моделювання вихідних характеристик БТПК відповідно до розробленої моделі за допомогою програмних засобів MicroSim 8.0 (PSPICE 8.0) і MultiSim 6.01. Встановлено, що характеристики отримані в системі МАЕС – П практично цілком ідентичні залежностям, розрахованим по багаторівневим моделям напівпровідникових компонентів з бібліотек інших пакетів програм. Використання MultiSim 6.01 для дослідження БТПК показало більш високий ступінь розбіжності результатів з іншими тестовими системами, тому що обчислювальні алгоритми в системі MultiSim 6.01 мають більшу простоту, а використовувані моделі не враховують особливостей малосигнальних режимів роботи компонентів.

Якісно результати досліджень збігаються для всіх трьох програмних засобів, а кількісні розходження, що спостерігаються, пояснюються різними рівнями опису моделей біполярного і МОН – транзисторів у системах MicroSim 8.0 і MultiSim 6.01.

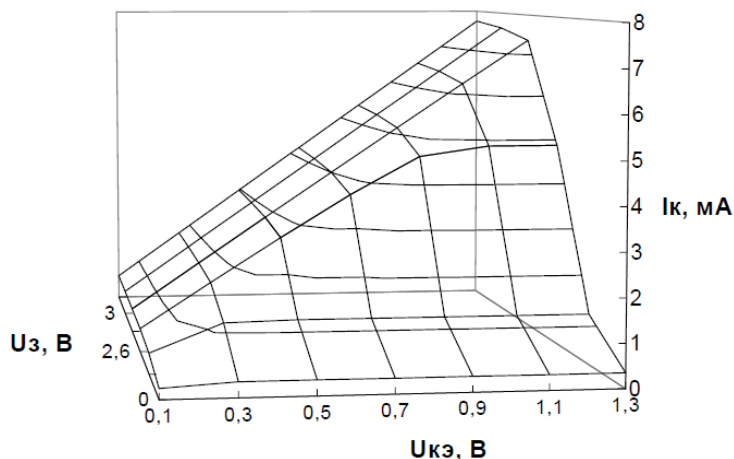


Рисунок 2 - Залежність струму колектора від напруги колектор - емітер при різних напругах на затворі БТПК

Проведені розрахунки і одержані характеристики адекватні характеристикам найбільш близьких до БТПК приладових напівпровідникових структур – TIGBT (розрахункове значення критерію Фішера - 1,23457, не перевищують критичне - 2,81793, і визначений ним рівень значущості - 0,36644, не менше заданого - 0,05).

Результати фізико-топологічного моделювання БТПК співпадають з результатами дослідження на основі розробленої моделі і не виходять за межі довірчого інтервалу 95%. Показано, що зважаючи на високі обчислювальні витрати на фізико-топологічне моделювання, його раціонально використовувати для визначення параметрів розробленої еквівалентної схеми БТПУ і подальшої її реалізації в системі МАЭС-П [5].

Разом з тим, одержані характеристики БТПК підтвердили теоретичні передумови про можливість автоматичного підстроювання її параметрів. Отже, таку структуру можна використовувати як основу для побудови адаптивних ДПВ, а розроблену модель розширити до моделі ДПВ. Таким чином, узагальнена містить ЧЕ, КЕ у вигляді плівки піроелектрика і ВЕ у вигляді БТПК [2]. Робота ДПВ супроводжується зміною вихідного параметра ВЕ в результаті зміни потенціалу на одному з електродів БТПК, електрично з'єднаному з піроелектриком. Нагрівання піроелектрика відбувається за рахунок перетворення потужності сигналу в теплоту за допомогою ЧЕ. Оцінка чутливості підсистеми датчика “поглинач + піроелектрик” показала, що для ДПВ, який працює в квазістаціонарному режимі, інтенсивність хвилі, що викликає підвищення температури на 1К залежить від теплопровідності середовища в корпусі; розмірів датчика; відношення повної площі поверхні датчика до площі

поглинаючої поверхні та від ефективного коефіцієнта відбиття випромінювання ДПВ [6].

Розроблені структури ДПВ [7], що наведені на рис. 3, відповідно до яких вимірювальний перетворювач містить підкладку 1, із кремнію n-типу з орієнтацією (100), на якій виконана ізопланарна транзисторна структура з бічною SiO₂-ізоляцією, у який за допомогою анізотропного травлення виконаний паз 2, дно якого розташоване в області колектора 3, а області бази 4 і емітера 5 обмежені однією зі стінок паза, на стінках паза сформований шар SiO₂ - 6 і додатковий польовий електрод - затвор 7. На колекторний контакт 8 послідовно наносяться шари піроелектрика 9 і металовуглецевого композита 10, що здійснюють перетворення потужності сигналу.

Розроблено кілька видів конструктивно-технологічного виконання ДПВ (рис. 3): а) с ЧЕ і КЕ в ланцюзі колектора БТПК; б) с ЧЕ і КЕ в ланцюзі затвора БТПК; в) с ЧЕ і КЕ в ланцюзі бази БТПК [7].

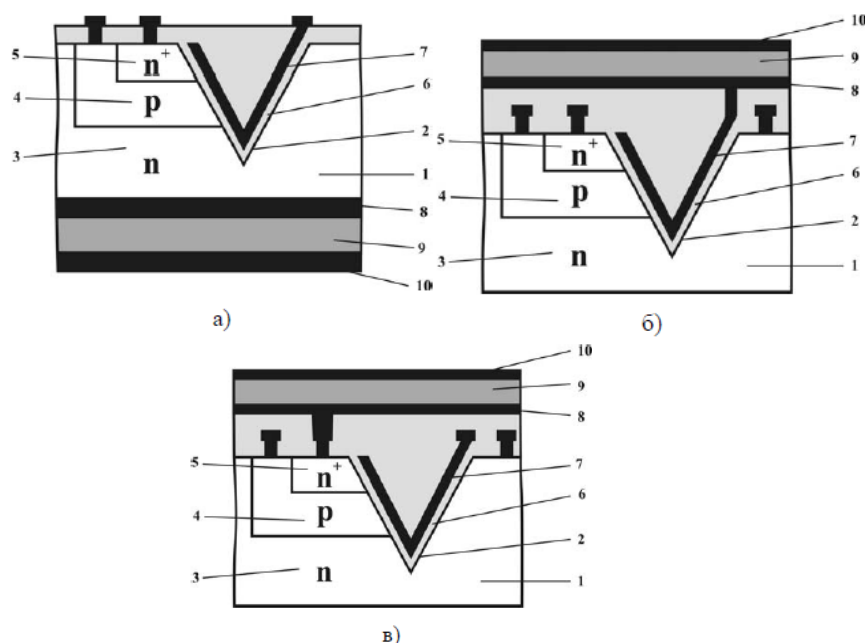


Рисунок 3 - Варіанти структур ДПВ

В ДПВ реалізуються три режими роботи : а) режим безпосереднього виміру амплітуди вихідного сигналу; б) режим вибору виду вихідної характеристики ДПВ; в) режим модуляції вихідного сигналу.

Проведено аналіз досліджених ДПВ у межах тривалості активного імпульсу падаючого випромінювання [8]. З урахуванням того, що потужність випромінювання W можна представити як суму потужності, затрачуваної на переполяризацію піроелектрика, розташованого між ЧЕ і БТПК та потужності, що розсіюється датчиком шляхом випромінювання і теплопровідності, математична модель перетворення сенсора може бути представлена у вигляді:

$$i_p = W \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

де:

$$\gamma = \frac{\rho \cdot A^2 \cdot \eta}{\alpha} \cdot \frac{1}{\tau};$$

i_p - піроелектричний струм КЕ; t - час; ρ - піроелектричний коефіцієнт; η - коефіцієнт емісії КЕ; ρ - щільність піроелектричного матеріалу; A - площа ЧЕ; α - постійна, що характеризує тепловіддачу за допомогою теплопровідності і випромінювання; τ - постійна, що не залежить від температури і часу. З метою посилення вихідного сигналу й адаптації вимірювального перетворювача до зовнішнього впливу, був використаний БТПК. Відповідно до рис. 3 розглянуто схеми з підключенням ЧЕ і КЕ до ланцюга затвору і з підключенням ЧЕ і КЕ до ланцюга бази БТПК. Особливістю першого варіанта є те, що еквівалентна схема сенсора містить у собі схему заміщення БТПК, у ланцюг затвора якої введено джерело піроелектричного струму J_p і конденсатор C_1 , що характеризує власну ємність підсистеми ЧЕ + КЕ датчика. Струм джерела J_p описується рівнянням (1), а ємність C_1 розраховується на основі даних по формулі плоского конденсатора. У процесі моделювання датчика за допомогою пакета програм МАЭС-П зроблено висновок, що розглянутий варіант датчика є граничним елементом [8], що реагує на задану величину потужності випромінювання (рис.4).

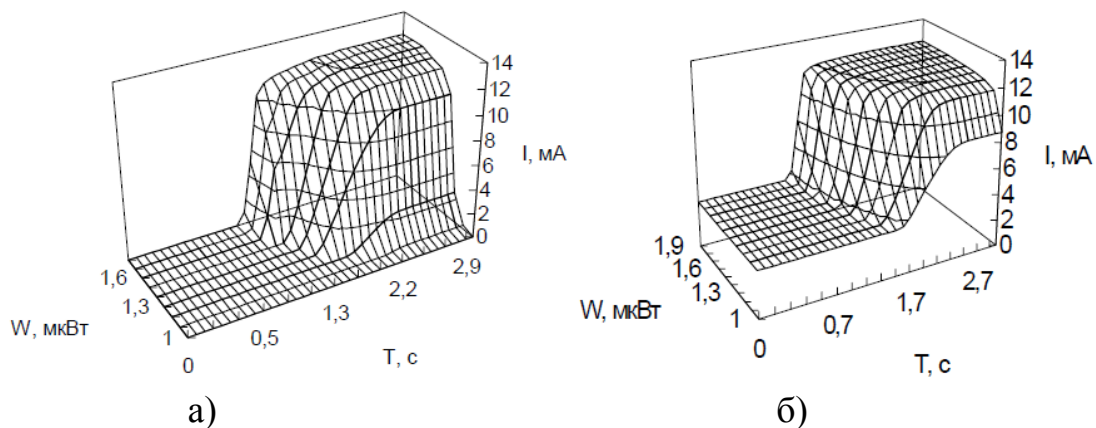


Рисунок 4 - Залежність вихідного струму датчика з підключенням підсистеми ЧЕ і КЕ до затвору БТПК від потужності випромінювання: а) відсутність струму настроювання; б) струм настроювання дорівнює 50 мкА.

Вважаючи, що включення датчика відбувається в момент появи випромінювання, вираз для граничної потужності спрацьовування датчика можна представити у вигляді:

$$W_{\text{ПОР}} = \frac{\tau^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha}{\rho \cdot \delta \cdot A \cdot \eta} \cdot \left(2,4 - \frac{2}{3} \cdot \theta \cdot U_{\text{БЭ}}\right), \quad (2)$$

де: δ - товщина піроелектрика; θ - поправочний коефіцієнт; $U_{БЭ}$ - напруга база - емітер у БТПК.

З рівняння (2) слідує, що поріг спрацювання датчика можна регулювати, змінюючи потенціал бази БТПК.

Особливістю другого варіанту датчика є підключення ЧЕ і КЕ до бази БТПК. При цьому настроювання ДПВ здійснюють шляхом зміни напруги затвор – емітер [9]. Результати розрахунків наведені на рис. 5.

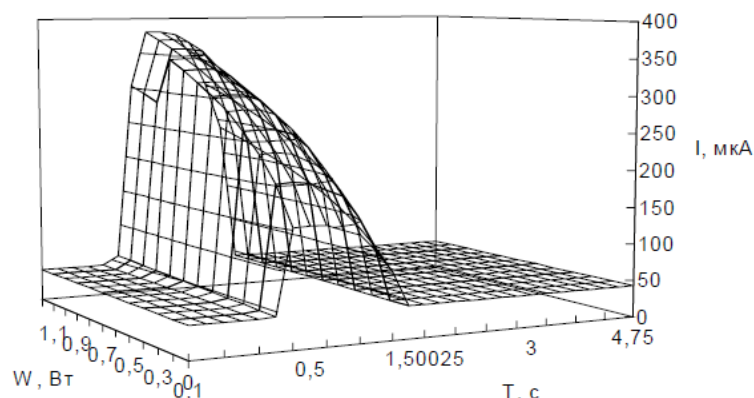


Рисунок 5 - Залежність вихідного струму датчика з підключенням підсистеми ЧЕ і КЕ до бази БТПК від потужності випромінювання

Аналіз отриманих даних показав, що сигнал піроелектричного струму підсилюється БТПК. Форма вихідного сигналу датчика корелює з формою імпульсу струму піроелектрика. Збільшення регульовального потенціалу затвора не спотворює форми вихідного імпульсу при зростанні величини вихідного струму. Таким чином, розв'язується проблема посилення імпульсу струму піроелектрика, але залишається необхідність подальшого перетворення вихідного імпульсу.

Виконано перевірку адекватності моделювання ДПВ на макетному вимірювальному стенді [2]. В основі макета ДПВ лежить макет БТПК. Виміри виконувались для вихідних характеристик при $I_B = 50$ мкА; передатних - при $U_{КЭ} = 0,8$ В. Статистична обробка результатів вимірювань виконувалась з використанням програми статистичної обробки даних STATISTIKA 2.2. Максимальне значення середньоквадратичної похибки не перевищує $2,64 \cdot 10^{-4} A^2$ при вимірюванні залежності від напруги живлення і $4,55 \cdot 10^{-5} A^2$ при вимірі залежності від струму бази, а всі отримані величини не виходять за межі 95 % - інтервалу надійності. Апроксимуючі криві, математично описуються багаточленами різного порядку. Вибір порядку апроксимуючого рівняння провадився з міркування найбільш близького розташування аналітичних і експериментальних точок.

Піроелектричний струм КЕ ДПВ є складною функцією його геометричних розмірів, фізичних характеристик піроелектричного матеріалу, умов теплообміну датчика з навколишнім середовищем і формується під дією двох основних чинників – величини приросту температури ЧЕ і швидкості зміни приросту температури. Тому, актуальним є дослідження розподілу тепла в структурі ДПВ і визначення його інерційності на основі рішення нестационарної теплової задачі.

З цією метою була використана система Elcut, в якій процеси теплопередачі в досліджуваному датчику розраховувалися по двовимірному рівнянню теплопровідності і отримане значення інерційності ДПВ становить 3с. З метою оптимізації конструкції датчика по величині інерційності, було проведено дослідження конструкції, що має додатковий теплоізолюючий шар з фторопласту-4. Аналіз розподілу тепла в оптимізованій конструкції ДПВ [9] показує, що при створенні додаткового теплоізолюючого шару з фторопласту-4 товщиною 1 мкм, інерційність знижується до 1с, а величина градієнта температур на поверхнях піроелектричного перетворювача підвищується в два рази, збільшуючи, таким чином величину чутливості.

Розроблені ДПВ характеризуються адаптивним регулюванням чутливості в межах 0,125-7,5 мА/мкВт для варіанта включення підсистеми ЧЕ+КЕ у ланцюг затвора БТПК, і 0,267-1 мА/Вт для варіанта включення підсистеми ЧЕ+КЕ у ланцюг бази БТПК. Динаміка зміни вихідного струму ДПВ показує, що перший варіант є бінарним датчиком, а другий – аналоговим. Ці результати дозволяють використовувати піроелектричні ДПВ для створення високоточних автоматизованих контрольно-вимірювальних систем, не потребуючих охолодження датчиків [7].

Дослідження макетів БТПК і ДПВ показали адекватність результатів досліджень моделі ДПВ. Крім того, це показує можливість реалізації досліджуваних ДПВ як у рамках технології кремнієвих ІС, так і з заміною вертикальної інтеграції на горизонтальну в рамках технології гібридних мікроборок і модулів [2].

Результати порівняння розроблених датчиків з найбільш близькими ним зарубіжними аналогами дозволяють використовувати піроелектричні ДПВ для створення високоточних автоматизованих контрольних – вимірювальних систем, що не вимагають охолодження датчиків.

Висновки

Теоретично встановлена і експериментально підтверджена можливість автоматичного підстроювання параметрів БТПК. Розроблені конструкції ДПВ на основі БТПК, які включають функціонально інтегровані підсистеми поглинача випромінювання, перетворювача енергії випромінювання на основі піроелектрика і БТПК як виконуючий елемент. Теоретично показано, що конструкції піроелектричних ДПВ визначають способи вимірювання потужності, що реалізуються за допомогою додаткових схем обробки вихідних сигналів датчиків.

Експериментально встановлено, що розроблені методики і моделі раціонально використовувати для експресної оцінки характеристик датчиків. Встановлена можливість адаптивного регулювання чутливості розроблених датчиків залежно від рівня потужності випромінювання шляхом зміни умов проходження електричного струму в БТПК.

Визначено, що розроблені ДПВ характеризуються адаптивним регулюванням чутливості для варіанту включення підсистеми ЧЕ+КЕ в ланцюг затвора БТПК в межах 0,125-7,5 мА/мВт і 0,267-1 мА/Вт в ланцюг бази БТПК.

Встановлено, що ДПВ з включенням підсистеми ЧЕ+КЕ в ланцюг затвора БТПК реєструє перевищення контрольованим випромінюванням порігового значення потужності в діапазоні 0,4-1,4 мВт, при нелінійності перетворення 0,32%, а в ланцюг бази БТПК здійснює вимірювання потужності випромінювання шляхом визначення амплітуди вихідного імпульсу струму датчика в діапазоні 0,1-1,2 Вт, при використанні додаткової лінійної ланки з максимальною похибкою 0,106%.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Резнев, А. А., Вернер, В. Д.. Тенденции развития МЭМС [Текст] / А. А. Резнев, В. Д. Вернер - М.: Амиант, 2010. – 572 с.
2. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур: научное издание [Текст] / В. Л. Костенко, Е. Я. Швець, Е. Н. Киселев, Н. А. Омельчук. – Запорожье : ЗГИА, 2001. – 101 с. – Библиогр. : с. 96-99. – ISBN 966-7101-36-3.
3. Device & Process Simulation: Part №: MPEM – CAD – Simulator – TCAD, Available at: <http://www.microport.com.tw/english/SingleP.asp?Category=175&PNo=262&Url=Product&page=1> (accessed 6 November 2017)
4. Костенко, В.Л. Исследование Би-МОП структуры для интегрированных датчиков мощности излучений [Текст] / В. Л. Костенко, Е. Н. Киселев, Глазева О.В // Холодильна техніка і технологія, №5 (91), 2004. – С. 92 – 97.
5. Киселев, Е.Н. Моделирование характеристик комбинированной транзисторной структуры [Текст] / Е. Н. Киселев, В. Л. Костенко // “Металлургия”, Сб. науч. трудов , – Запорожье: ЗГИА, 1997. - С.352-357.
6. Киселев, Е.Н. Дистанционное измерение тепловых потоков малой мощности [Текст] / Е. Н. Киселев, В. Л. Костенко // “Металлургия”, Сб. науч. трудов , – Запорожье: ЗГИА, 2001. - С.352-357.
7. Костенко, В.Л. Дослідження адаптивного сенсора потужності випромінювання [Текст] / В. Л. Костенко, Є. Я. Швець, Є. М. Кісельов // Вісник НУ Львівська політехніка, №443, 2002 – С.163-169
8. Костенко, В.Л., Автоуправляемые микроэлектронные датчики [Текст] / В. Л. Костенко, Е. Я. Швець, Е. Н. Киселев // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблемі сучасної електротехніки” Ч. 6. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2002. С. 118-120.
9. Швець, Е.Я., Разработка и исследование интегрированных комбинированных датчиков мощности излучений [Текст] / Е. Я. Швець, Е. Н. Киселев // «Радиоэлектроника. Информатика. Управление», №2(14), 2005. – С. 37-42.

Стаття подана до редакції 17.11.2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізька державна інженерна академія



**ЕЛЕМЕНТИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОЇ
ТЕХНІКИ**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

**ELEMENTS, DEVICES AND SYSTEMS OF ELECTRONIC
TECHNIQUE**

Випуск 1 (1)

Видається з 2017 року

ISSN 2524-2423

**Засновник та видавець: Запорізька державна інженерна академія
«Свідectво про державну реєстрацію»,
серія ДК № 2958 від 03.09.2007 р.**

Запоріжжя

ЗДІА

2017

УДК 621.38
Е 456

Головний редактор

Левінзон Д.І., д-р техн. наук, професор

Заступник головного редактора

Хрипко С.Л., д-р техн. наук, професор

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

- Бахрушин В.Є. доктор фіз.-мат. наук, професор (Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя)
- Бочеріков Ю. Ю. доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник (Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ)
- Вербицький В.Г. доктор фіз.-мат. наук, професор (Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя)
- Готра З.Ю. доктор техн. наук, професор (Львівський національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)
- Дейбук В. Г. доктор фіз.-мат. наук, професор (Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, м. Чернівці)
- Кідалов В.В. доктор фіз.-мат. наук, професор (Бердянський державний педагогічний університет, м. Бердянськ)
- Критська Т.В. доктор техн. наук, професор (Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя)
- Оселедчик Ю.С. доктор фіз.-мат. наук, професор (Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя)
- Романюк Б.М. доктор фіз.-мат. наук, професор (Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ)
- Стахіра П.Й. доктор техн. наук, професор (Львівський національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)
- Чугай О. М. доктор техн. наук, професор (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків)

Відповідальний редактор

Дмитрієв В.С.

Друкується за рішенням вченої ради Запорізької державної інженерної академії (протокол № 13 від 30 листопада 2017 р.)

ISSN 2524-2423

Е 456 Елементи, прилади та системи електронної техніки: Науковий журнал. – Вип.1(1)
/ Головн. ред. Д.І. Левінзон. – Запоріжжя, ЗДІА, 2017. – 122 с.

Розглянуто актуальні наукові і технологічні проблеми електроніки, наведено результати досліджень технології і практичних застосувань елементів, пристроїв та систем електронної техніки, висвітлено перспективи подальшого розвитку мікро- та наноелектронних інформаційних систем.

Журнал призначений для наукових та інженерно-технічних працівників, аспірантів і студентів технічних спеціальностей вузів, які ведуть науково-дослідну роботу і готують фахівців галузі електроніки та мікроелектронних інформаційних систем.

Лл. 45. Табл. 6. Бібліогр. 137 назв.

Матеріали випуску друкуються мовою оригіналу.

© Редакційна колегія, 2017

© Автори статей, 2017

© Запорізька державна інженерна академія, 2017