

УДК 681.35

**Кузавков В. В.**, канд. техн. наук, доцент (Тел. +380 (97) 642 50 76. E-mail: nevse@ukr/net)

**Гайдур Г. І.**, канд. техн. наук, доцент (Тел. +380 (67) 345 33 38. E-mail: gaydurg@gmail.com)

**Серых С. О.**, старший викладач (Тел. +380 (44) 249 25 64. E-mail: ssaanna888@gmail.com)

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ $p-n$ ( $n-p$ ) ПЕРЕХОДУ ДЛЯ МЕТОДУ ВЛАСНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Кузавков В. В., Гайдур Г. І., Серых С. О.** Діагностична модель  $p-n$  ( $n-p$ ) переходу для методу власного випромінювання. У статті розглядається нова діагностична модель  $p-n$  ( $n-p$ ) переходу для методу власного випромінювання. Процес визначення технічного стану сучасного радіоелектронного озброєння (РЕО) пов'язаний з реєстрацією та обробкою діагностичних параметрів (ДП) радіо електронних компонентів (РЕК), що входять до його складу. Використання нового методу діагностування – методу власного випромінювання, потребує використання нових діагностичних моделей, що відображують зв'язок ДП з фізико-хімічними властивостями РЕК.

**Ключові слова:** діагностична модель,  $p-n$  ( $n-p$ ) перехід, діагностичні параметри, метод власного випромінювання, безконтактний індукційний метод, напівпровідник

**Кузавков В. В., Гайдур Г. І., Серых С. А.** Диагностическая модель  $p-n$  ( $n-p$ ) перехода для метода собственного излучения. В статье рассматривается новая диагностическая модель  $p-n$  ( $n-p$ ) перехода для метода собственного излучения. Процесс определения технического состояния современного радиоэлектронного вооружения (РЭВ) связан с регистрацией и обработкой диагностических параметров (ДП) радио электронных компонентов (РЭК), которые входят в его состав. Использование нового метода диагностики – метода собственного излучения, требует использования новых диагностических моделей, отражающих связь ДП с физико-химическими свойствами РЭК.

**Ключевые слова:** диагностическая модель,  $p-n$  ( $n-p$ ) переход, диагностические параметры, метод собственного излучения, бесконтактный индукционный метод, полупроводник

**1. Вступ. Постановка задачі.** Сучасні об'єкти радіоелектронного озброєння (РЕО) представляють собою складні технічні системи, такі як системи з розширеним спектром [1], що являються об'єднанням модулів різного фізичного виконання та призначення. Проведення якісного діагностування цифрових блоків РЕО залежить від адекватності діагностичної моделі об'єкту контролю, методики проведення діагностування і застосованого методу діагностування [2, 3, 4, 5, 6].

Основою напівпровідникових РЕК є активні елементи (діоди, транзистори, інтегральні мікросхеми). Тому в основу діагностичної моделі цифрового блоку для методу власного випромінювання [7] покладено модель активних елементів що входять до складу цього блоку. Напівпровідниковий  $p-n$  ( $n-p$ ) перехід є фундаментом для будови більш складних напівпровідникових РЕК.

Для визначення діагностичних параметрів  $p-n$  ( $n-p$ ) переходу необхідно розробити діагностичну модель з урахуванням процесів, що в ньому відбуваються. Дані процеси можуть бути проаналізовані за допомогою моделей, що враховують не тільки електрофізичні, а і фізико-хімічні властивості елементів [7, 8]. Знання цих властивостей дозволяє використовувати метод власного випромінювання [9], в якому використовується найбільш інформативний параметр [10], що вимірюється в одній контрольній точці. Для цього необхідно розробити алгоритми і прикладні програми обчислення температури  $T$ -діагностичного параметру  $p - n$  ( $n - p$ ) переходу.

**Метою дослідження** є розробка діагностичної моделі  $p - n$  ( $n - p$ ) переходу для методу власного випромінювання, що ґрунтується на аналізі вольт-амперної характеристики (ВАХ) переходу.

Для досягнення мети дослідження:

– потрібен детальний аналіз залежності показників від температурних режимів і струму, що є окремим завданням;

– необхідно розробити алгоритм розрахунку температури кристалу  $p$ - $n$  переходу в залежності від прикладеної до нього напруги та фізико-хімічних властивостей напівпровідника.

**Розв'язання завдання дослідження.** Для прямої гілки ВАХ реального  $p$ - $n$  переходу характерна наявність омичного спадання напруги в шарі бази. Це спадання напруги незначне в області малих струмів, але зростає лінійно зі збільшенням струму, приводячи до виродження експоненціальної ВАХ ідеального діода [11, 12]. Виродження ВАХ може відбуватися при струмах в одиниці мА. Температурна залежність для спадання напруги в шарі бази має зворотний знак у порівнянні зі спаданням напруги на  $p$ - $n$  переході. Тому, при аналізі температурної залежності ВАХ, треба урахувувати опір шару бази  $p$ - $n$  переходу [8].

$$I = I_0 \left( \exp \frac{U - I r_b}{\varphi_T} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $I$  – струм через  $p$ - $n$  перехід;  $U$  – напруга на  $p$ - $n$  переході;  $I_0$  – тепловий струм;  $r_b$  – опір бази;  $\varphi_T$  – температурний потенціал.

У виразі (1) температурна залежними величинами є  $I_0$ ,  $r_b$ ,  $\varphi_T$ .

В свою чергу  $\varphi_T$  описується виразом:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}, \quad (2)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура;  $q$  – заряд електрона.

Тепловий струм  $I_0$  у загальному виді представляють як [6]:

$$I_0 = I_{00} \exp \left( - \frac{\varphi_3}{\varphi_T} \right), \quad (3)$$

де  $I_{00}$  – величина, що не залежить від температури;  $\varphi_T$  – температурний потенціал;  $\varphi_3$  – заборонена зона напівпровідника (також залежить від температури).

Для температурної залежності  $\varphi_3$  використовують лінійну апроксимацію [2, 3, 7]:

$$\varphi_3 = \varphi_{30} - \varepsilon_3 T, \quad (4)$$

де  $\varphi_{30}$  – ширина забороненої зони при нульовій температурі;  $\varepsilon_3$  – температурна чутливість.

Опір бази  $r_b$   $p$ - $n$  переходу може бути описано виразом [9]:

$$r_b = r_{b300} \left( \frac{T}{300} \right)^{5/2}, \quad (5)$$

де  $r_{b300}$  – опір бази  $p$ - $n$  переходу при 300 К.

З урахуванням (3) для теплового струму вираз (1) приймає вид:

$$I = I_{00} \exp \left( - \frac{\varphi_3}{\varphi_T} \right) \left( \exp \left( \frac{U - I r_b}{\varphi_T} \right) - 1 \right). \quad (6)$$

або:

$$U = \varphi_T \ln \left[ \frac{I}{I_{00}} \exp \left( \frac{\varphi_3}{\varphi_T} \right) + 1 \right] + I r_b. \quad (7)$$

Оскільки тепловий струм  $I_0$  дуже малий і зазвичай виконується співвідношення  $I \gg I_0$ , то (7) можна записати наступним чином:

$$U = \varphi_T \ln \frac{I}{I_{00}} + \varphi_3 + I r_b. \quad (8)$$

Підставивши в (8) вирази (2), (4) і (5) для величин, що залежать від температури, отримаємо:

$$U = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_{00}}\right) + \varphi_{30} - \varepsilon_3 T + I r_{6300} (T/300)^{5/2},$$

або

$$I r_{6300} (T/300)^{5/2} + \left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3\right) T + \varphi_{30} - U = 0. \quad (9)$$

Вираз (9) відображує залежність напруги на  $p$ - $n$  переході від струму та температури, щодо температури  $T$ , вище 2-й ступеня ( $5/2=2,5$  – ірраціональний ступінь) не має формули для знаходження коренів. Рішення рівняння можливо чисельними методами на ЕОМ. Нам потрібен один дійсний корінь рівняння, що є шуканою температурою. Якщо зневажити спаданням напруги в області бази (в області малих струмів) тоді рівняння (9) зводиться до лінійного рівняння:

$$\left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3\right) T + \varphi_{30} - U = 0, \quad (10)$$

рішенням якого буде:

$$T = \frac{U - \varphi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3}. \quad (11)$$

Вираз (11) дозволяє визначити температуру кристалу напівпровідника в залежності від струму через  $p$ - $n$  перехід та фізико-хімічних властивостей напівпровідника.

Підставивши в (11) значення струму через  $p$ - $n$  перехід [4]:

$$I = -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2. \quad (12)$$

отримаємо математичну модель температурної залежності  $p$ - $n$  переходу:

$$T = \frac{U - \varphi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \left( \frac{-\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2}{I_{00}} \right) - \varepsilon_3}. \quad (13)$$

Вираз (13) є математичною моделлю залежності температури кристалу  $p$ - $n$  переходу від напруги, що прикладене до нього.

Отримана модель дозволяє визначити нагрів кристалу напівпровідника, або кількість тепла як діагностичний параметр процесів що відбуваються в напівпровіднику.

На основі розробленої математичної моделі складено алгоритм розрахунку температури кристалу  $p$ - $n$  переходу в залежності від прикладеної до нього напруги та фізико-хімічних властивостей напівпровідника Рис. 1. В алгоритмі на Рис. 1 для спрощення записів використовувались номери формул, за якими проводяться розрахунки (вершини алгоритму 7, 8, 10, 11).

Розрахунок базується на математичній залежності величин  $I_0$ ,  $r_6$ ,  $\varphi_T$  від температури  $T$  і струму  $I$  через  $p$ - $n$  перехід.

Аналіз процесу виготовлення сучасних напівпровідникових РЕК показав їх багат шарову конструкцію.

В спрощеному вигляді це: тримач кристала, підкладка зі “зрошеним” кристалом РЕК та герметична і механічно міцна оболонка.

Рішення завдання нестационарної теплопровідності в багат шаровому об'єкті (РЕК) полягає у визначенні величин теплофізичних характеристик шарів за заданим часовими залежностям температур біля поверхні РЕК і температури самої поверхні.

Отриманому завданню відповідає одномірною прямою задачею нестационарної теплопровідності.

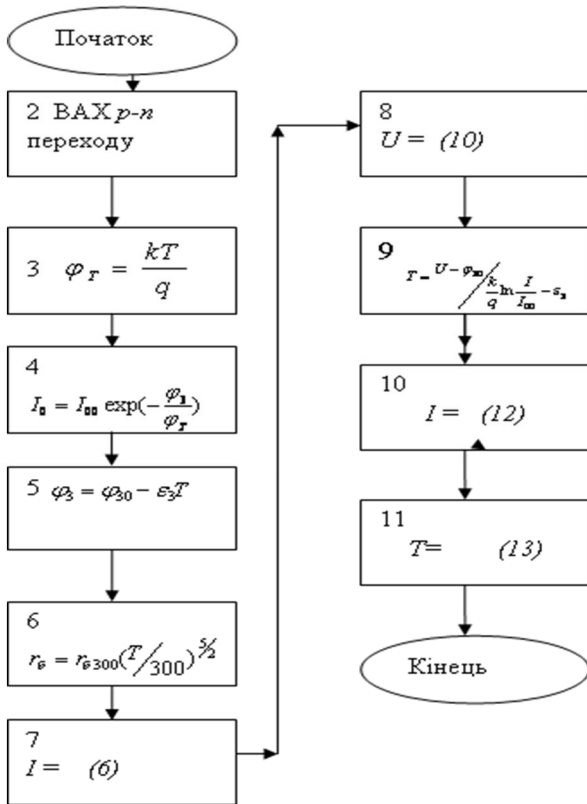


Рис. 1. Алгоритм розрахунку температури кристалу *p-n* переходу

Представимо РЕК як багатошаровий об'єкт, зображений на Рис. 2.

Орієнтуємо вісь *Z* перпендикулярно до границь між шарами РЕК (перпендикулярно його поверхні), а осі *X* і *Y* – паралельно їй. Точку відліку (0,0,0) помістимо на одну з поверхонь багатошарової конструкції (внутрішня поверхня). Вісь *Z* направимо до протилежної сторони конструкції (зовнішня поверхня). Для справедливості одновимірного наближення необхідно, щоб розмір об'єкту в площині (*XY*) (довжина та ширина РЕК) перевищував розмір вздовж осі *Z* (висота РЕК).

Так як під час експлуатації сучасних засобів РЕО під впливом теплових потоків температура поверхонь РЕК може змінюватись в діапазоні 40-60<sup>0</sup>С, що суттєво впливає на їх вихідні показники і потребує додаткового використання засобів примусового охолодження, то рівняння теплопровідності Фур'є

$$C(z)\rho(z) = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \lambda(z) \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}$$

доцільно для аналізу записати у вигляді:

$$T(z,t) = \int_0^t C(z)\rho(z) dt ,$$

де:  $T(z,t)$  залежність температури від координати  $z$  і часу  $t$ ;  $C(z)$  – питома теплоємність;  $\rho(z)$  – щільність;  $\lambda(z)$  – коефіцієнт теплопровідності.

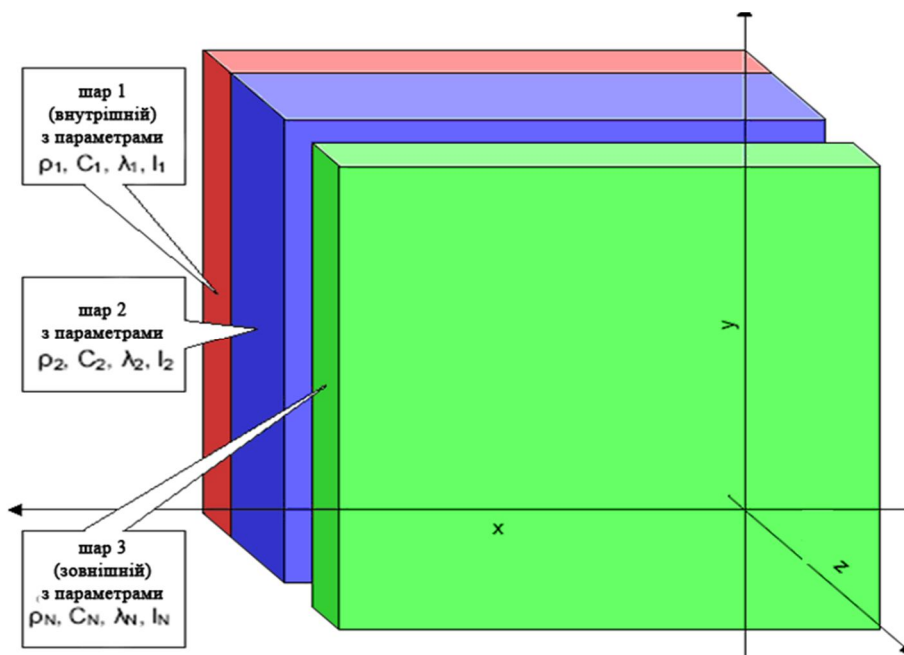


Рис. 2. Багатошаровий об'єкт, в якому рішення одновимірної задачі теплопровідності вважається справедливим

Це головні значення теплофізичних характеристик матеріалу шарів об'єкту, що зазвичай досліджується. На цьому етапі дослідження діагностичної моделі  $p$ - $n$  ( $n$ - $p$ ) переходу в РЕК теплофізичні характеристик матеріалів шарів будемо вважати постійними у середині кожного з шарів. Тоді значення функцій на відповідних ділянках позначаються як:  $C_n$ ,  $\rho_n$  и  $\lambda_n$ , де  $n$  відповідає номерам шарів, перехід між якими досліджується.

**Висновки.** На основі проведеного аналізу процесів  $p$ - $n$  ( $n$ - $p$ ) переходу розроблено діагностичну модель цього переходу для методу власного випромінювання.

Розроблена діагностична модель  $p$ - $n$  ( $n$ - $p$ ) переходу дозволяє визначати його діагностичні параметри у вигляді залежності температури від струму та електрофізичних і фізико-хімічних параметрів.

*Напрямок подальшого дослідження* є деталізація розробленого алгоритму розрахунку температури кристалу  $p$ - $n$  переходу в залежності від прикладеної до нього напруги та фізико-хімічних властивостей напівпровідника та моделювання механізму передачі тепла від “розігрітого” кристалу  $p$ - $n$  переходу на “поверхню” РЕК.

### **Література**

1. Серых С. А. Оценка безопасности систем радиосвязи с расширенным спектром / С. А. Серых, Г. И. Гайдур, О. В. Кокотов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2008. – Т.6, № 2. – С. 123-128.
2. Гаврилов Р. А. Технология производства полупроводниковых приборов / Р. А. Гаврилов, А. М. Скворцов. – Ленинград : Энергия, 1968. – 240 с.
3. Фогельсон И. Б. Транзисторные термодатчики / И. Б. Фогельсон. – Москва : Сов. Радио, 1972. – 128 с.
4. Вишнівський В. В. Аналіз методів форсованих випробувань для отримання залежності зміни діагностичного параметра від часу напруцювання напівпровідникових РЕК / В. В. Вишнівський, В. В. Василенко, В. В. Кузавков // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2014. – Вип. 4(32). – С. 102-106.
5. Вишнівський В. В. Пристрій контролю технічного стану цифрових вторинних джерел живлення з використанням методу динамічного впливу навантаження / В. В. Вишнівський, Ю. В. Кожедуб // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2011. – Том 9, №4. – С. 355-360.
6. Вишнівський В. В. Діагностування аналогових і цифрових пристроїв радіоелектронної техніки : монографія / В. В. Вишнівський, Жердев М. К., Ленков С. В. та ін.; під ред. Жердева М. К., Ленкова С. В. – К.: ТОВ «Компанія ЛПК», 2009. – 224 с.
7. Вишнівський В. В. Безконтактний індукційний метод діагностування радіоелектронних блоків / В. В. Вишнівський, М. К. Жердев, Б. П. Креденцер, В. В. Кузавков, Є. В. Редзюк // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2013. – №43. – С.17-22.
8. Бобков Ю. В. Побудова температурної моделі  $p$  -  $n$  переходу / Ю. В. Бобков , О. Ю. Бобков // Механіка гіроскопічних систем. – 2011. – Вип. 24. – С. 75-84.
9. Громов В. С. Зависимость температурного коэффициента прямого падения напряжения на  $p$ - $n$  переходе транзистора от величины прямого тока / В. С. Громов, Б. Л. Перельман // Полупроводниковые приборы и их применение : сборник статей. – Вып. 18. – Москва : Сов. радио, 1967. – С.71-79.
10. Жердев М. К. Алгоритм аналізу фізичних процесів та діагностична модель транзистора в ключовому режимі / М. К. Жердев, В. В. Кузавков // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні : науково-технічний збірник. – 2014. – Вип. №1(27) . – 26 с.
11. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. П. Степаненко. – Москва : Энергия, 1973. – 608 с.
12. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко. – Москва : Сов. Радио, 1980. – 424 с.

Дата надходження в редакцію: 26.12.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Манько