УДК 681.35 к.т.н. **Шкуліпа П.А.** (ОДАТРЯ)

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМІ ВІДСІЧКИ ДЛЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

Розглядається алгоритм побудови діагностичної моделі транзистора в режимі відсічки для енергодинамічного методу діагностування. Даний алгоритм дозволяє визначати діагностичні параметри транзистора і являється основою для побудови автономних автоматизованих систем технічного діагностування об'єктів радіоелектронної техніки.
Ключові слова: діагностична модель, енергодинамічний метод

Рассматривается алгоритм построения диагностической модели транзистора в режиме отсечки для энергодинамического метода диагностирования. Данный алгоритм позволяет определять диагностические параметры транзистора и является основой для построения автономных автоматизированных систем технического диагностирования объектов радиоэлектронной техники
Ключевые слова: диагностическая модель, энергодинамический метод

An algorithm for the construction of the diagnostic model transistor in the cutoff Energodynamic method of diagnosis. This algorithm allows to determine the diagnostic parameters of the transistor, and is the basis for a stand-alone automated technical diagnostic facilities of electronic equipment
Keywords: diagnostic model Energodynamic method

Вступ. Сучасні об'єкти радіоелектронної техніки представляють собою складні технічні системи, що являються об'єднанням модулів різного фізичного виконання й призначення. Своєчасне виявлення й усунення причин відмов радіоелектронної техніки на місці експлуатації приводить до підвищення кількісних характеристик надійності і зниженню витрат на їх експлуатацію. Це визначає необхідність проведення якісного діагностування цих об'єктів.

До складу об'єктів радіоелектронної техніки входять аналогові і цифрові радіоелектронні пристрої. Проведення їх якісного діагностування покладається на їх системи технічного діагностування. Проведення якісного діагностування аналогових і цифрових радіоелектронних компонентів залежить від адекватності діагностичної моделі об'єкта контролю, методики проведення діагностування і методу діагностування [1, 2].

Аналіз стану проблеми. Стрімкий розвиток мікроелектроніки та інформаційних технологій потребує від конструкторів і виробників сучасних автономних автоматизованих систем технічного діагностування (АА СТД) розробки нових методів отримання та обробки діагностичної інформації для визначення технічного стану аналогових і цифрових пристроїв [1, 2]. Існуюче протиріччя між принциповою можливістю побудови високоефективних автономних автоматизованих систем технічного діагностування на основі використання останніх досягнень в області мікроелектроніки і низькою ефективністю існуючих автономних автоматизованих систем технічного діагностування в об'єктах РЕТ пропонується вирішити створенням сучасних АА СТД на основі нових методів отримання та обробки діагностичної інформації.

Перспективними методом технічного діагностування являється енергодинамічний метод. Однією із складових, що визначають метод діагностування являється діагностична модель об'єкта діагностування (ОД). Основою напівпровідникових радіоелектронних компонентів радіоелектронних пристроїв являються активні елементи (транзистори). Тому перед тим як будувати ДМ радіоелектронного пристрою для енергодинамічного методу діагностування [3] необхідно розглянути модель транзистора. Для визначення діагностичних параметрів транзистора необхідно розробити його діагностичну модель з урахуванням

процесів, що в ньому протікають. Дані процеси можуть бути проаналізовані за допомогою моделей, що враховують не тільки електрико-фізичні, а й фізико-хімічні властивості елементів в залежності від часу напрацювання. Знання цих властивостей дозволяє використовувати енергодинамічний метод діагностування, в якому використовується один найбільш інформативний параметр, що вимірюється в одній контрольній точці. Побудову діагностичної моделі пропонується проводити з використанням сучасних інформаційних технологій. Для цього необхідно розробити алгоритм і прикладну програму для побудови ДМ транзистора в режимі відсічки.

Постановка задачі. Таким чином, в статті вирішується наукове завдання розробки діагностичної моделі транзистора для режиму відсічки, яка дозволяє оцінити вплив різних дефектів на діагностичні параметри об'єкта діагностування.

Виклад основного матеріалу. При розробці діагностичної моделі транзистора в режимі відсічки скористаємося класичними моделями Еберса-Мола, Бьюфойя-Спаркса, Лінвілла. При проведені аналізу процесів в транзисторі введемо наступні припущення:

тип транзистора *n-p-n*;

в області бази існує прискорююче поле;

домішки в базі вздовж вісі X (вісь, перпендикулярна переходам) розподілені за експоненційним законом;

колектор характеризується дифузійним механізмом переносу носіїв;

емітерний перехід вважається різким, а колекторний плавним;

модель транзистора в режимі відсічки одновимірна.

При аналізі процесів транзистора в режимі відсічки застосовується одномірна модель [4]. Розглянемо дві складові цієї моделі:

а) стаціонарну, в якій зміна надлишкової концентрації електронів n в активну область бази протягом часу старіння t' не відбувається, іншими словами $\partial n/\partial t' = 0$;

б) складову, що описує процес старіння, для якої число акцепторів $N_{\text{а}}$ та донорів $N_{\text{ä}}$ є функціями часу старіння t'.

Стаціонарна складова моделі може бути визначена наступним чином. Записуємо рівняння неперервності та розв'яжемо його при граничних умовах. Результати розв'язання підставляємо до рівняння струмів в напівпровідниках і визначаємо всі струми транзистора.

Якщо врахувати, що $t << t'$, де t – час перехідних процесів, то на достатньо великому проміжку часу модель можна розглядати як стаціонарну, для якої рівняння неперервності має вигляд [3]:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{2\eta}{W}\frac{\partial n}{\partial x} - \frac{n}{L_n^2} = 0, \qquad (1)$$

де W – ширина бази;

η – коефіцієнт поля в базі;

L_n – довжина дифузійного зміщення електронів в базі.

Введемо граничні умови

$$n_1 = n_p^0\left(\mathrm{e}^{\lambda U_{\text{áá}}} - 1\right), \qquad n_2 = n_p^W\left(\mathrm{e}^{\lambda U_{\text{áê}}} - 1\right),$$

де n_p^0, n_p^W – рівноважні концентрації в базі на границі емітерного та колекторного переходів відповідно;

$U_{\text{áá}}$, $U_{\text{áê}}$ – напруги, прикладені до емітерного та колекторного переходів відповідно.

В цих умовах розв'язком диференціального рівняння (1) є функція:

$$n(x) = n_1\,\mathrm{e}^{-\frac{ax}{2}}\frac{\operatorname{sh}\theta(W-x)}{\operatorname{sh}\theta W} + n_2\,\mathrm{e}^{-\frac{a}{2}(W-x)}\frac{\operatorname{sh}\theta x}{\operatorname{sh}\theta W}, \qquad (2)$$

де $\theta = \sqrt{(\frac{\eta}{W})^2 + \frac{1}{L_n^2}}$; $a = \frac{2\eta}{W} = \frac{\ln K}{2}$; $\lambda = \frac{q}{KT}$.

Використовуючи рівняння квазінейтральності, можна записати [3]:

$$\phi - U_{\text{å}} = \frac{KT}{q}\ln\frac{p_p}{p_n}; \qquad \phi - U_{\text{å}} = \frac{KT}{q}\ln\frac{n_n}{n_p}; \tag{3}$$

де q – заряд електрона;

$\phi = \frac{KT}{q}\ln\frac{N_{\text{a}}N_{\text{ä}}}{n_i^2}$ – контактна різниця потенціалів.

Позначимо $\chi = \frac{n_i^2}{N_{\text{a}}N_{\text{ä}}}\text{e}^{\lambda U_{\text{áä}}}$.

Розв'язуючи систему рівнянь (3), отримаємо

$$p_n = \frac{\chi}{1-\chi^2}\left(N_{\text{a}} + \chi N_{\text{ä}}\right);$$

$$p_p = \frac{1}{1-\chi^2}\left(N_{\text{a}} + \chi N_{\text{ä}}\right);$$

$$n_p = \frac{\chi}{1-\chi^2}\left(N_{\text{ä}} + \chi N_{\text{a}}\right);$$

$$n_n = \frac{1}{1-\chi^2}\left(N_{\text{ä}} + \chi N_{\text{à}}\right).$$

Густина струму може бути визначена по відомому рівнянню струмів у напівпровіднику

$$j_n = q\mu_n n(x_1)E(x) + qD_n\frac{dn(x_1)}{dx}, \tag{4}$$

де μ_n – проникливість електронів;

$E(x)$ – напруженість електричного поля в точці x;

D_n – коефіцієнт концентрації електронів.

Після множення обох частин виразу (4) на площу напівпровідника S (зокрема, колектора), диференціювання виразу (2) і підстановки результату диференціювання до виразу (4) отримаємо наступні аналітичні залежності для струмів:

емітера

$$I_{\text{å}} = qD_nS(\theta\,\text{cth}\,\theta W + \eta)n_1 - qD_nS\theta\,\text{sch}\,\theta W K^{0,5}n_2; \tag{5}$$

колектора

$$I_{\text{ê}} = -qD_nK^{0,5}\,\text{sch}\,\theta W n_1 + qD_nS(\theta\,\text{cth}\,\theta W - \eta)n_2. \tag{6}$$

Позначимо

$A = qD_nS(\theta\,\text{cth}\,\theta W + \eta)n_1;$

$B = qD_nS\theta\,\text{sch}\,\theta W K^{0,5}n_2;$

$C = qD_n\theta K^{0,5}S\,\text{sch}\,\theta W n_1;$

$D = qD_nS(\theta\,\text{cth}\,\theta W - \eta)n_2;$

Тоді запис статичної моделі ідеального транзистора має вигляд:

$$\begin{aligned} I_{\text{å}} &= A\left(\text{e}^{\lambda U_{\text{áä}}} - 1\right) - B\left(\text{e}^{\lambda U_{\text{áê}}} - 1\right); \\ I_{\hat{e}} &= -C\left(\text{e}^{\lambda U_{\text{áä}}} - 1\right) - D\left(\text{e}^{\lambda U_{\text{áê}}} - 1\right). \end{aligned} \tag{7}$$

В режимі відсічки обидва переходи зміщені в зворотному напрямку, при цьому через електроди закритого транзистора протікають:

а) струми з активної області бази, що визначаються виразом (7).

Якщо ми знехтуємо експоненціальними членами, ці струми описуються виразами:

$$I_{\text{е}}^{a} = -qD_n S_{\text{е}} n_p^0 \theta \left[\frac{a}{2\theta} + \operatorname{cth} W' - \operatorname{csch} \theta W' \, \text{e}^{\frac{aW'}{2}} \right]; \tag{8}$$

$$I_{\hat{\text{е}}}^{a} = qD_n S_{\text{е}} n_p^0 \theta \, \text{e}^{\frac{aW'}{2}} \left[\operatorname{csch} \theta W' - \text{e}^{\frac{aW'}{2}} \left(\operatorname{cth} \theta W - \frac{q}{2\theta} \right) \right]; \tag{9}$$

$$I_{\acute{\text{а}}}^{a} = I_{\text{е}}^{a} + I_{\hat{\text{е}}}^{a}, \tag{10}$$

де,

$$W' = W_0 - 0{,}5 \left(\frac{9\varepsilon\varepsilon_0 \left| U_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}} - U_{\hat{\text{е}}\grave{\text{а}}} \right|}{qN'} \right)^{1/3}; \tag{11}$$

$$n_p^0 \left(\text{e}^{\lambda U_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}}} - 1 \right) = -n_p^0; \tag{12}$$

$$n_p^w \left(\text{e}^{\lambda U_{\acute{\text{а}}\hat{\text{е}}}} - 1 \right) = -n_p^0 \, \text{e}^{aW'}; \tag{13}$$

$$\left| U_{\acute{\text{а}}\hat{\text{е}}} \right|, \ \left| U_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}} \right| > (2...3)\varphi_{\grave{\text{о}}};$$

б) струм колектора з пасивної області бази з урахуванням поверхневої рекомбінації має вигляд [3] :

$$I_{\hat{\text{е}}}^{n} = qD_n \left(S_{\hat{\text{е}}} - S_{\grave{\text{а}}} \right) n_p^W \theta \frac{\dfrac{S}{\theta} \left[\operatorname{ch} W_n' \theta - \dfrac{a}{2\theta} \operatorname{sh} W_n \theta \right] + D_n \left[\operatorname{sh} W_n' \theta - \dfrac{a^2}{4\theta^2} \operatorname{sh} W_n' \theta \right]}{\dfrac{S}{\theta} + \operatorname{sh} W_n' \theta + D_n \left[\operatorname{ch} W' \theta + \dfrac{a}{2\theta} \operatorname{sh} W' \theta \right]} \tag{14}$$

в) струми термогенерації в переходах. Величина струму термогенерації пропорційна об’єму, який займає перехід. При концентрації носіїв в переходах, близькій до власної, кількість пар, що утворились в переході за одиницю часу, рівна

$$N = \frac{S \ln n_i}{\tau_i}. \tag{15}$$

Тоді струми термогенерації емітерного $I_{\grave{\text{о}}\tilde{\text{а}}}^{\mathring{\text{а}}}$ та колекторного $I_{\grave{\text{о}}\tilde{\text{а}}}^{\hat{\text{е}}}$ переходів відповідно рівні:

$$I_{\grave{\text{о}}\tilde{\text{а}}}^{\mathring{\text{а}}} = 0{,}5 \frac{q}{\tau_i} S_{\mathring{\text{а}}} n_{\text{е}} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_a} \left| U_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}} \right|}; \tag{16}$$

$$I_{\grave{\text{о}}\tilde{\text{а}}}^{\hat{\text{е}}} = 0{,}5 \frac{q}{\tau_\varepsilon} S_{\hat{\text{е}}} n_i \sqrt{\frac{9\varepsilon\varepsilon_0}{qN'} \left| U_{\acute{\text{а}}\hat{\text{е}}} \right|}. \tag{17}$$

Складові струму бази, що обумовлені інжекцією неосновних носіїв $S_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \left(I_{\mathring{\text{а}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \right)$ і $S_{\hat{\text{е}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \left(I_{\hat{\text{е}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \right)$, та складову рекомбінаційного струму в пасивній області бази, яка обумовлена інжекцією неосновних носіїв бічною поверхнею колекторного переходу $\left(I_{\hat{\text{е}}}^{\text{їàñ}} \right)$, можна визначити, використовуючи закон переходу:

$$I_{\mathring{\text{а}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} = \frac{1}{L_n} qD_n S_{\text{е}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \tilde{n}_p^0 \left(\text{e}^{\lambda U_{\acute{\text{а}}\grave{\text{а}}}} - 1 \right); \tag{18}$$

$$I_{\hat{\text{е}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} = \frac{1}{L_n} qD_n S_{\hat{\text{е}}}^{\acute{\text{а}}^3\div} \tilde{n}_p^W \left(\text{e}^{\lambda U_{\acute{\text{а}}\hat{\text{е}}}} - 1 \right); \tag{19}$$

$$I_{\hat{\text{е}}}^{\text{їас}} = \frac{1}{L_n} qD_n S_n n_p^W \left(\text{e}^{\lambda U_{\acute{\text{а}}\hat{\text{е}}}} - 1 \right). \tag{20}$$

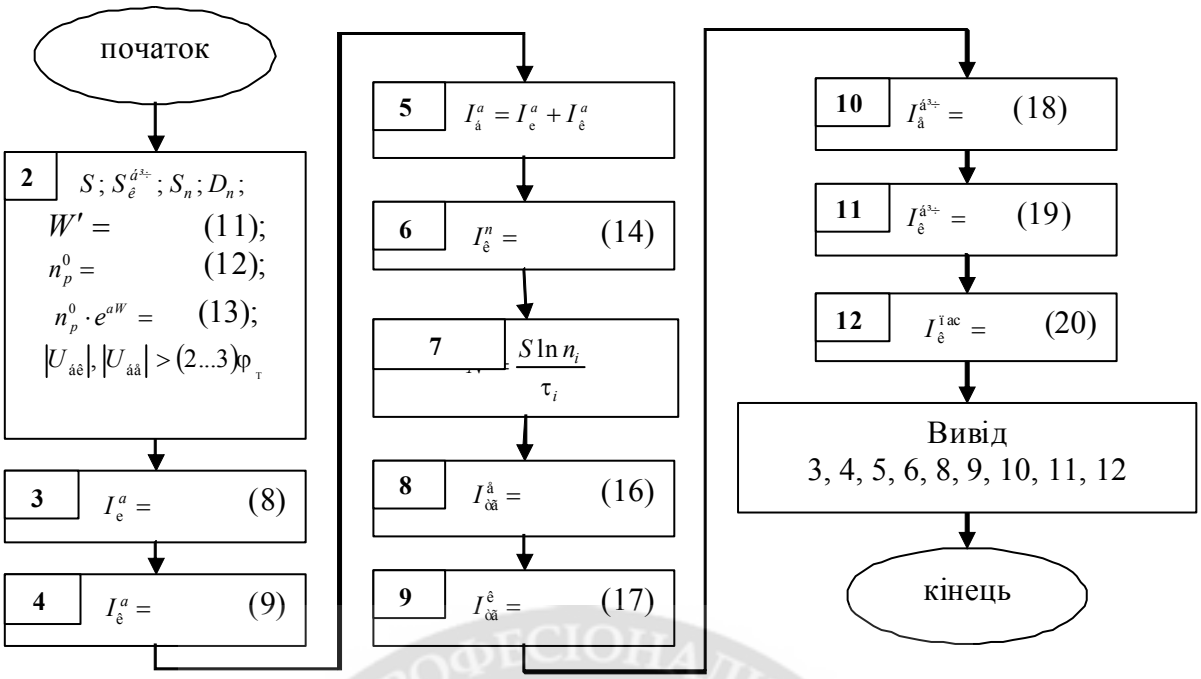

Рис. 1. Алгоритм побудови діагностичної моделі транзистора в режимі відсічки

Результати проведеного аналізу дають змогу визначити діагностичну модель роботи транзистора в режимі відсічки для енергодинамічного методу діагностування у вигляді залежностей струму $I_{\text{å}}$ і $I_{\text{ê}}$ від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів.

Для побудови діагностичних моделей різних типів транзисторів розроблено алгоритм, що приведений на рис. 1 [4].

Висновки. Проведений аналіз процесів транзистора в режимі відсічки роботи дозволив зробити наступні висновки:

- розроблено діагностичну модель транзистора в режимі відсічки для енергодинамічного методу діагностування;
- розроблена діагностична модель транзистора дозволяє визначати його діагностичні параметри у вигляді залежностей струму $I_{\text{å}}$ і $I_{\text{ê}}$ від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів;
- для різних типів транзисторів розроблено алгоритм побудови діагностичних моделей, що приведений на рис.1.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шкуліпа П.А. Шляхи і методи підвищення ефективності автономних автоматизованих систем технічного діагностування радіоелектронних пристроїв спеціального призначення / Шкуліпа П.А., Жердєв М.К., Лєнков С.В., Гунченко Ю.О. // Журнал «Сучасна спеціальна техніка», 2012. – № 3(30). – С 69 – 74.

2. Шкуліпа П.А. Основні напрямки розвитку автоматизованих систем технічного діагностування об’єктів радіоелектроніки // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2012. – № 6. – С.192 – 194.

3. Гаховичт С.В. Аналз видів дефектів мікропроцесорних великих інтегральних схем і умови їх прояву з урахуванням енергодинамічного процесу / С.В. Гаховичт, М.І. Рєзніков, І.В. Пампуха // Зб. наук. пр. КВІУЗ. Вип. №3. – К.: КВІУЗ, 2000. – С. 142–149.

4. Шкуліпа П.А. Алгоритми побудови діагностичної моделі транзистора для енергодинамічного методу діагностування // Наукові нотатки постійно діючого семінару науковців, здобувачів та ад’юнктів. Вип. №21. – К: ВІКНУ, 2011. – С.33–46.

Рецензент: д.т.н., проф. Жердєв М.К.