

М.К. Жердев¹, д.т.н., проф., **П.А. Шкуліпа³**, к.т.н., **Г.Б. Жиров²**, к.т.н., с.н.с., **С.І. Глухов²**, к.т.н.

¹Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації «Київський політехнічний інститут»;

²Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ;

³Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ РЕЖИМУ ВІДСІЧКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕНЕРГОДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

Розглядається нова діагностична модель транзистора в режимі відсічки для енергодинамічного методу діагностування. Ця діагностична модель 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.

Н.К. Жердев, д.т.н., проф., **П.А. Шкуліпа**, к.т.н. **Г.Б. Жиров**, к.т.н., с.н.с., **С.І. Глухов**, к.т.н.

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ РЕЖИМА ОТСЕЧКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭНЕРГОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Рассматривается новая диагностическая модель транзистора в режиме отсечки для энергодинамического метода диагностирования. Эта диагностическая модель позволяет определять диагностические параметры транзистора и является основой для построения автономных автоматизированных систем технического диагностирования объектов радиоэлектронной техники.

Ключевые слова: диагностическая модель, энергодинамический метод.

N. Zherdev, ScD, **P. Shkulipa**, PhD, **G. Zirov**, PhD, **S. Gluchov**, PhD.

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC CUTOFF MODE TRANSISTOR MODELS USING ENERGO DINAMICHESKOGO METHOD OF DIAGNOSIS

Is the new diagnostic model of transistor in pinch-off mode energy dynamic method for diagnosis. This diagnostic model allows to determine the diagnostic parameters of the transistor and is basis for the construction of the off-line automated systems of the technical diagnosticating of objects of radio electronic technique.

Keywords: diagnostic model, energy dynamic method.

Вступ

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 [1]. До складу об'єктів радіоелектронної техніки входять аналогові і цифрові радіоелектронні пристрої. Проведення їх якісного діагностування покладається на їх системи технічного діагностування.

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]. 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 [2] 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.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи автономних автоматизованих систем технічного діагностування в об'єктах РЕТ за рахунок використання енергодинамічного методу діагностування.

Виклад основного матеріалу

При розробці діагностичної моделі транзистора в режимі відсічки скористаємося класичними моделями Еберса-Мола, Бьюфоя-Спаркса, Лінвілла. При проведенні 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 експоненціальним 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 одновимірна модель [3]. 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_a та донорів N_d 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 $t \ll t'$, де t – час перехідних процесів, то на достатньо великому проміжку часу модель можна розглядати як стаціонарну, для якої рівняння неперервності має вигляд [3]:

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

де W – ширина бази; η – коефіцієнт поля в базі; L_n – довжина дифузійного зміщення електронів в базі.

Введемо граничні умови

$$n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{\text{бе}}} - 1), \quad n_2 = n_p^W (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1),$$

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

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

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

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

де $\theta = \sqrt{\left(\frac{\eta}{W}\right)^2 + \frac{1}{L_n^2}}$;

$$a = \frac{2\eta}{W} = \frac{\ln K}{2};$$

$$\lambda = \frac{q}{KT}.$$

Використовуючи рівняння квазінейтральності, можна записати [3]:

Колектора

$$\phi - U_e = \frac{KT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}; \quad \phi - U_e = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p}; \quad (3)$$

$$I_k = -qD_n K^{0.5} \operatorname{sch} \theta W n_1 + qD_n S (\theta \operatorname{cth} \theta W - \eta) n_2. \quad (6)$$

де q – заряд електрона;

Позначимо

$$\phi = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad - \text{ контактна різниця}$$

потенціалів.

Позначимо

$$\chi = \frac{n_i^2}{N_a N_d} e^{\lambda U_{\text{бк}}}.$$

Розв'язуючи систему рівнянь (3), отримаємо

$$p_n = \frac{\chi}{1 - \chi^2} (N_a + \chi N_d);$$

$$p_p = \frac{1}{1 - \chi^2} (N_a + \chi N_d);$$

$$n_p = \frac{\chi}{1 - \chi^2} (N_d + \chi N_a);$$

$$n_n = \frac{1}{1 - \chi^2} (N_d + \chi N_a).$$

Густина струму може бути визначена по відомому рівнянню струмів у напівпровіднику

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

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) отримуємо наступні аналітичні залежності для струмів:

Емітера

$$I_e = qD_n S (\theta \operatorname{cth} \theta W + \eta) n_1 - qD_n S \theta \operatorname{sch} \theta W K^{0.5} n_2; \quad (5)$$

$$A = qD_n S (\theta \operatorname{cth} \theta W + \eta) n_1;$$

$$B = qD_n S \theta \operatorname{sch} \theta W K^{0.5} n_2;$$

$$C = qD_n \theta K^{0.5} S \operatorname{sch} \theta W n_1;$$

$$D = qD_n S (\theta \operatorname{cth} \theta W - \eta) n_2.$$

Тоді запис статичної моделі ідеального транзистора має вигляд:

$$I_e = A (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) - B (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1); \quad (7)$$

$$I_k = -C (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) - D (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1)$$

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:

$$\begin{cases} I_e^a = -qD_n S_e n_p^0 \theta \left[\frac{a}{2\theta} + \operatorname{cth} W' - \operatorname{csch} \theta W' e^{\frac{aW'}{2}} \right]; \\ I_k^a = qD_n S_e n_p^0 \theta e^{\frac{aW'}{2}} \left[\operatorname{csch} \theta W' - e^{\frac{aW'}{2}} \left(\operatorname{cth} \theta W - \frac{q}{2\theta} \right) \right]; \\ I_e^a = I_e^a + I_k^a, \end{cases}$$

де:

$$W' = W_0 - 0,5 \left(\frac{9\epsilon\epsilon_0 |U_{\text{бк}} - U_{\text{ке}}|}{qN'} \right)^{1/3};$$

$$n_p^0 (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) = -n_p^0;$$

$$n_p^w (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) = -n_p^0 e^{aW'};$$

$$|U_{\text{бк}}|, |U_{\text{бк}}| > (2...3);$$

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

$$I_k^n = qD_n(S_k - S_e)n_p^w \theta \frac{\frac{S}{\theta} \left[\text{ch} W_n' \theta - \frac{a}{2\theta} \text{sh} W_n' \theta \right] + D_n \left[\text{sh} W_n' \theta - \frac{a^2}{4\theta^2} \text{sh} W_n' \theta \right]}{\frac{S}{\theta} + \text{sh} W_n' \theta + D_n \left[\text{ch} W_n' \theta + \frac{a}{2\theta} \text{sh} W_n' \theta \right]} \quad (8)$$

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

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

Тоді струми термогенерації емітерного $I_{\text{тг}}^e$ та колекторного $I_{\text{тг}}^k$ переходів відповідно рівні:

$$I_{\text{тг}}^e = 0,5 \frac{q}{\tau_i} S_e n_e \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_a} |U_{\text{бе}}|}; \quad (9)$$

$$I_{\text{тг}}^k = 0,5 \frac{q}{\tau_\varepsilon} S_k n_i \sqrt{\frac{9\varepsilon\varepsilon_0}{qN'} |U_{\text{бк}}|}. \quad (10)$$

Складові струму бази, що обумовлені інжекцією неосновних носіїв $S_{\text{бе}}^{\text{біч}}(I_e^{\text{біч}})$ і $S_k^{\text{біч}}(I_k^{\text{біч}})$, та складову рекомбінаційного струму в пасивній області бази, яка обумовлена інжекцією неосновних носіїв бічною поверхнею колекторного переходу ($I_k^{\text{пас}}$), можна визначити, використовуючи закон переходу:

$$I_e^{\text{біч}} = \frac{1}{L_n} qD_n S_e^{\text{біч}} \tilde{n}_p^0 (e^{\lambda U_{\text{бе}}} - 1); \quad (11)$$

$$I_k^{\text{біч}} = \frac{1}{L_n} qD_n S_k^{\text{біч}} \tilde{n}_p^W (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1); \quad (12)$$

$$I_k^{\text{пас}} = \frac{1}{L_n} qD_n S_n n_p^W (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1). \quad (13)$$

Результати проведеного аналізу дають змогу визначити діагностичну модель роботи транзистора в режимі відсічки для енергодинамічного методу діагностування у

вигляді залежностей струму I_e і I_k від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів.

Для побудови діагностичних моделей різних типів транзисторів розроблено алгоритм на основі сучасних інформаційних технологій [3].

Висновки

Проведений аналіз процесів транзистора в режимі відсічки роботи дозволив зробити важливі практичні висновки:

– розроблено діагностичну модель транзистора в режимі відсічки роботи для енергодинамічного методу діагностування;

– розроблена діагностична модель транзистора дозволяє визначати його діагностичні параметри у вигляді залежностей струму I_e і I_k від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів;

– для побудови діагностичних моделей різних типів транзисторів необхідно розробити прикладну програму на основі алгоритму, що приведений в [3].

Список використаних джерел:

1. Клец Ю.П. Бессловарный поиск неисправностей – новый подход к диагностированию цифровых устройств / Ю.П. Клец, Ю.Г. Савченко, В.Н. Чешун // Управляющие системы и машины. – 2001. – № 3. – С. 36 - 41.
2. Гаховичт С.В. Аналіз видів дефектів мікропроцесорних великих інтегральних схем і умови їх прояву з урахуванням енергодинамічного процесу / С.В. Гаховичт, М.І. Резніков, І.В. Пампуха // Зб. наук. пр. КВІУЗ. Вип. №3. – К.: КВІУЗ, –2000. –С. 142 - 149.
3. Шкуліпа П.А. Алгоритми побудови діагностичної моделі транзистора для енергодинамічного методу діагностування // Наукові нотатки постійно діючого семінару науковців, здобувачів та ад'юнктив. Вип. №21. – К: ВІКНУ, – 2011. – С.33 - 46.

Рецензент: д.т.н., професор Ленков С.В., Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ