

УДК 681.518

П.А. Шкуліпа¹, М.К. Жердев²¹Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса²Військовий інститут Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, Київ

ПОБУДОВА ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНЗИСТОРА В АКТИВНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ ДЛЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

Розглядається нова діагностична модель транзистора в активному режимі роботи для енергодинамічного методу діагностування. Ця діагностична модель дозволяє визначати діагностичні параметри транзистора.

Ключові слова: діагностична модель, енергодинамічний метод.

Вступ

Структурною частиною об'єктів радіоелектронної техніки (РЕТ) являються радіоелектронні пристрої (РЕП), що складаються з напівпровідникових радіоелектронних компонентів. Проведення якісного діагностування аналогових і цифрових радіоелектронних компонентів залежить від адекватності діагностичної моделі (ДМ) об'єкта контролю, методики проведення діагностування і методу контролю технічного стану. Умовою прояву дефекту є зміна діагностичних параметрів (ДП) при виникненні будь-якого дефекту у радіоелектронних компонентах [1].

Основою напівпровідникових радіоелектронних компонентів РЕП являються активні елементи (транзистори). Тому перед тим як будувати ДМ радіоелектронного пристрою для енергодинамічного методу діагностування [2] необхідно розглянути модель транзистора. Для визначення ДП транзистора необхідно розробити його ДМ 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 ДМ пропонується проводити з використанням сучасних інформаційних технологій. Для цього необхідно розробити алгоритм і прикладну програму для побудови ДМ транзистора в активному режимі роботи.

Виклад основного матеріалу

У даній статті вирішується задача побудови діагностичної моделі транзистора в активному режимі роботи. При цьому скористаємося класичними моделями Еберса-Мола, Бьюфойя-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 активному режимі одновимірною.

При аналізі процесів в активному режимі транзистора застосовується одновимірною 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

$$n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{be}} - 1); \quad n_2 = n_p^W (e^{\lambda U_{bc}} - 1),$$

де n_p^0 ; n_p^W – рівноважні концентрації в базі на границі емітерного та колекторного переходів відповідно; U_{be} ; U_{bc} – напруги, прикладені до емітерного та колекторного переходів відповідно.

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

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

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

Використовуючи рівняння квазінейтральності, можна записати [3]:

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

де q – заряд електрона; $\varphi = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$ – контактна різниця потенціалів.

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

Розв'язуючи систему рівнянь (3), отримаємо

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

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

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) отримаємо наступні аналітичні залежності для струмів:

емітера

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

колектора

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

Позначимо

$$A = qD_n S (\theta \text{cth } \theta W + \eta) n_1; \quad B = qD_n S \theta \text{sch } \theta W K^{0.5} n_2;$$

$$C = qD_n \theta K^{0.5} S \text{sch } \theta W n_1; \quad D = qD_n S (\theta \text{cth } \theta W - \eta) n_2;$$

Тоді запис статичної моделі ідеального транзистора має вигляд:

$$\begin{aligned} I_e &= A(e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) - B(e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1); \\ I_k &= -C(e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) - D(e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1). \end{aligned} \quad (7)$$

При цьому в моделі за додатній напрям струмів для транзистора n-p-n зазвичай приймається напрям від області “p” до “n”, тобто i_e^M (струм бази) втікає в базу, i_e^M та i_k^M (струми емітера та колектора) витікають із областей емітера та колектора.

Як наслідок, в прийнятій моделі

$$i_e^M = i_e^M + i_k^M.$$

В бездрейфовому транзисторі поле бази відсутнє, тобто $\ln K = 0$; $N_{a0} = N_a^W$; $\theta = \frac{1}{L_n}$, тому вираз (7)

має вигляд:

$$I_e = qD_n S \text{cth } \frac{W}{L_n} \cdot \frac{1}{L_n} n_1 - qD_n S \text{csch } \frac{W}{L_n} \cdot \frac{1}{L_n} n_2;$$

$$I_k = -qD_n \text{csch } \frac{W}{L_n} \cdot S \frac{1}{L_n} n_1 + qD_n S \text{coth } \frac{W}{L_n} \cdot \frac{1}{L_n} n_2.$$

Складова рекомбінаційного струму в емітерному переході описується виразом [3]:

$$I_e^{\text{рек}} = qSI^* \frac{\varphi_T}{\Delta\varphi_0 - U_{\text{бк}}} \cdot \frac{n_i^2}{\tau} e^{\frac{\lambda}{2} U_{\text{бк}}}, \quad (8)$$

$$\text{де } I^* = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (\Delta\varphi_0 - U_{\text{бк}})^{1/2}}{qN_a} \right)^{1/2}; \quad \Delta\varphi_0 = \varphi + \ln \frac{n_n}{n_p};$$

$n_i^2 = p_p^0 n_p^0 = N_a^0 n_p^0$; ε – електрична стала; ε_0 – діелектрична провідність.

Інші складові знаходимо із виразу (4):

значення електронної складової струму емітера

$$I_e^n = qD_n S (\theta \text{cth } \theta W + \eta) n_p^0 e^{\lambda U_{\text{бк}}}, \quad (9)$$

при умові $n_1 \neq 0$, $n_2 \neq 0$;

значення електронної складової струму колектора

$$I_k^n = qD_n S (\theta \text{cth } \theta W - \eta) n_p^W (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1) \quad (10)$$

при умові $n_1 \neq 0$, $n_2 \neq 0$.

Результати проведеного аналізу дають змогу визначити діагностичну модель транзистора в активному режимі роботи 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 активному режимі роботи дозволив зробити важливі практичні висновки:

1) розроблено діагностичну модель транзистора в активному режимі роботи для енергодинамічного методу діагностування;

2) 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;

3) для побудови діагностичних моделей для різних типів транзисторів необхідно розробити прикладну програму на основі алгоритму приведенного в [3].

Список літератури

1. Клец Ю.П. Бесловарный 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. Гахович С.В. Удосконалений метод діагностування цифрових пристроїв з використанням параметрів енергодинамічного процесу при відновленні їх працездатності у військових ремонтних органах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 20.02.14 / С.В. Гахович. – К., 2004. – 20 с.

3. Шкуліпа П.А. Алгоритми побудови діагностичної моделі транзистора и для енергодинамічного методу діагностування // Наукові нотатки постійно діючого семінару науковців, здобувачів та ад'юнктів. Вип. №21 – К: ВІКНУ, 2011. – С.32–45.

Надійшла до редколегії 20.06. 2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА В АКТИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ДЛЯ ЭНЕРГОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

П.А. Шкулипа, М.К. Жердев

Рассматривается новая диагностическая модель транзистора в активном режиме работы для энергодинамического метода диагностирования. Эта диагностическая модель позволяет определять диагностические параметры транзистора.

Ключевые слова: диагностическая модель, энергодинамический метод.

CONSTRUCTION OF DIAGNOSTIC MODEL OF TRANSISTOR IN ACTIVE OFFICE HOURS FOR ENERGO-DYNAMIC METHOD OF DIAGNOSING

П.А. Shkulipa, M.K. Zherdev

The new diagnostic model of transistor is examined in the active mode robots for the energo-dynamic method of diagnosing. This diagnostic model allows to determine the diagnostic parameters of transistor.

Keywords: diagnostic model, energo-dynamic method.