ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 5, № 3 (2004) С. 584-588

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 5, № 3 (2004) P. 584-588

УДК 621.382.323

ISSN 1729-4428

В.І. Тимофєєв, О.В. Семеновська, М.В. Приходько

Особливості моделювання процесів саморозігріву у субмікронних гетероструктурних транзисторах

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ-056, 03056,
E-mail: timof@ntu-kpi.kiev.ua, sem@phbme.ntu-kpi.kiev.ua

В статті представлено схемну модель гетеробіполярного транзистора, що враховує ефект саморозігріву. Проведено аналіз параметрів схемної моделі транзистора. Визначено критерій вибору значень баластного опору. Показано вплив ефекту саморозігріву на частотні характеристики однокаскадного підсилювача надвисоких частот.

Ключові слова: саморозігрів, моделювання, гетероструктурний біполярний транзистор.

Стаття поступила до редакції 17.01.2004; прийнята до друку 30.08.2004.

I. Вступ

При схемотехнічному моделюванні субмікронних напівпровідникових пристроїв, зокрема, гетероструктурних біполярних транзисторів (ГСБТ), одним з важливих аспектів є урахування впливу ефектів саморозігріву на електричні характеристики досліджуваних пристроїв. Подібні ефекти зумовлені зростанням температури напівпровідникового пристрою в результаті розсіювання потужності при досить високих значеннях робочих струмів. При цьому зростання напруги електричного поля в активній області транзистора призводить до виникнення сильнопольових ефектів, зв'язаних з розігрівом носіїв. Дрейф і дифузія у сильному електричному полі, особливо в області переходів, може призводити до накопичення носіїв, у тому числі за рахунок їх міждолинного переходу у багатодолинному напівпровіднику (GaAs), що призводить до росту ефективної маси та зменшення рухомості. Крім того, в області бази можуть підсилюватися процеси генерації і рекомбінації. Інтегрально ці процеси можуть призводити до зміни робочої точки на вольт-амперній характеристиці і до процесів запізнювання вихідного струму при імпульсному вхідному впливові. Проблема опису ефектів саморозігріву особливо актуальна для транзисторів, що працюють у режимі великого сигналу, коли робоча точка еволюціонує в широкому діапазоні значень напруги живлення. У більшості математичних моделей напівпровідникових пристроїв, що входять до складу пакетів схемотехнічного моделювання, це урахування виявляється некоректним [1,2]. З позицій схемотехнічного моделювання адаптація математичної моделі напівпровідникового пристрою для урахування ефектів саморозігріву зводиться до знаходження відхилення між ізотепловим режимом і саморозігрівом з наступним визначенням параметрів процедури урахування ефектів саморозігріву в залежності від знайденого теплового відхилення робочих струмів.

Для субмікронних гетероструктурних транзисторів нелінійні відхилення вихідних струмів, що зумовлені саморозігрівом, та зміни струму колектора можна врахувати введенням додаткових складових у рівняння струмів базової або колекторної області. Однак подібна компенсація не є задовільною [1-4]. Найбільш точний вплив ефекту саморозігріву на електричні параметри субмікронних гетероструктурних транзисторів може бути розраховано, а надалі враховано, шляхом визначення залежностей параметрів пристрою від температури і відповідним доповненням математичних моделей

Рис. 1. Топологічна модель гетероструктурного біполярного транзистора.

отриманими залежностями [5-7].

Як структуру, що моделювалася, було обрано гетероструктурний біполярний транзистор (ГСБТ), що наведено на рисунку 1, з наступними електрофізичними параметрами: товщина бази 0,14 мкм з рівнем легування берилієм 10^{19} см$^{-3}$; товщина колектора 0,7 мкм із кремнієвим легуванням $7{,}5\times10^{15}$ см$^{-3}$; омічна металізація бази – сплав золота з берилієм, емітера і колектора – сплав золота з германієм. Верхній шар емітера складається з n^+- GaAs і декількох рівнів AlGaAs, що формують з'єднання бази з емітером. База являє собою тонкий шар p- GaAs, сильно насичений домішками, що дозволяє домогтися мінімізації її опору. Колектор складається зі слабко насиченого n-домішками шару GaAs, необхідного для зменшення опору колектора і забезпечення більш рівномірного поширення носіїв.

II. Постановка задачі

Дана стаття присвячена проблемі вибору методики розрахунку й урахування теплових ефектів і ефектів саморозігріву при моделюванні субмікронних гетероструктурних транзисторів.

Загальний підхід зводиться до вибору значень баластних опорів у колекторній і базовій областях транзисторної структури, що, у свою чергу, призводить до визначення типу зворотного зв'язку, а, отже, і типу нелінійного залежного джерела. Безпосередньо саме джерело відображає вплив ефекту саморозігріву.

Введений у модель зворотний зв'язок (ЗЗ) може бути як “позитивним” (ПЗЗ), так і “негативним” (НЗЗ). ПЗЗ здійснюється в тому випадку, коли в схемі як залежне джерело використовується джерело напруги, кероване напругою (ДНКН), як показано на рисунку 2, у цьому випадку зі збільшенням напруги колектор-емітер V_{KE} відбувається збільшення струму колектора, НЗЗ здійснюється при використанні залежного джерела струму, керованого напругою (ДСКН), і тоді зі збільшенням напруги V_K відбувається зменшення струму колектора.

Опори R_K, $R_Б$, R_E описують опори металізації. Дві пари діодів $D_{БЕ}$, D_{SE} і $D_{БК}$, D_{SK} описують нелінійності в ГСБТ. Перша пара діодів $D_{БЕ}$ і D_{SE} моделює зміну насичення струму при зміні струму колектора, $D_{БЕ}$ – моделює інжекцію електронів з емітеру, а D_{SE} – рекомбінацію в базі, область накопичення просторового заряду, поверхневу рекомбінацію й інші струми бази. Друга пара діодів $D_{БК}$, D_{SK} моделює залежність зворотного струму від напруги зміщення, $D_{БК}$ – моделює інжекцію електронів з колектора в базу або дірок з бази в колектор, D_{SK} – рекомбінацію в базі, область накопичення просторового заряду, поверхневу рекомбінацію й інші струми витоку бази при інверсному режимі роботи. Діод D_P – моделює діркову складову струму колектора, а ДНКН V_{th} – позитивний зворотній зв’язок, температурна залежність якого описується рівнянням: $V_{th} = \alpha R_{th} I_K V_K$, де α – коефіцієнт електротеплового ЗЗ [В/К]; R_{th} – тепловий опір [К/Вт]; I_K – струм колектора [А]; V_K – напруга на колекторі [В].

Струм бази в цій моделі описується двома парами паралельних діодів, відповідно, для переходу база-емітер і переходу база-колектор. Використання двох паралельних діодів для моделювання кожного переходу дозволяє розрахувати залежність підсилення струму від напруги зміщення. Перший діод кожного переходу відповідає струму рекомбінації в області просторового заряду (ОПЗ) при малих напругах зміщення. Ця складова струму пов’язана з прямозміщеним бар’єром з коефіцієнтом неідеальності n_E близьким до 2. Другий діод описує компоненту струму переходу між емітером і колектором.

Струм колектора в цієї моделі представлений коефіцієнтом неідеальності n_F у прямозміщеному переході. Так як струм колектора транзистора є результатом інжекції електронів у базу при дифузії, то коефіцієнт неідеальності близький до 1.

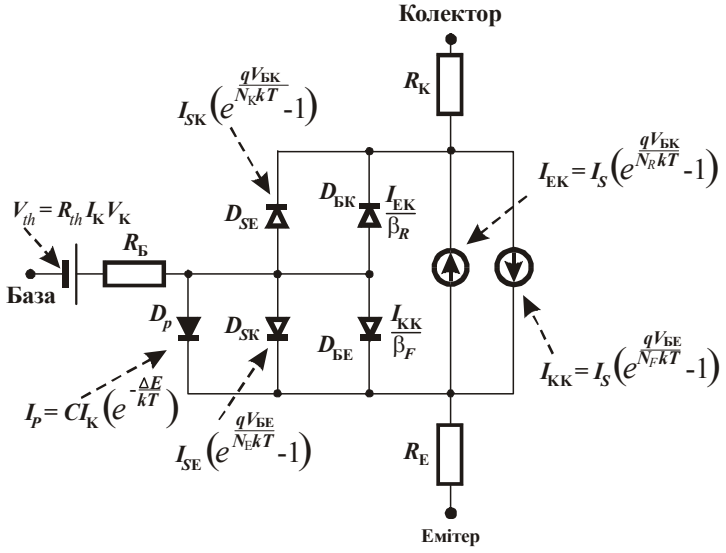

Рис. 2. Схема заміщення гетероструктурного біполярного транзистора.

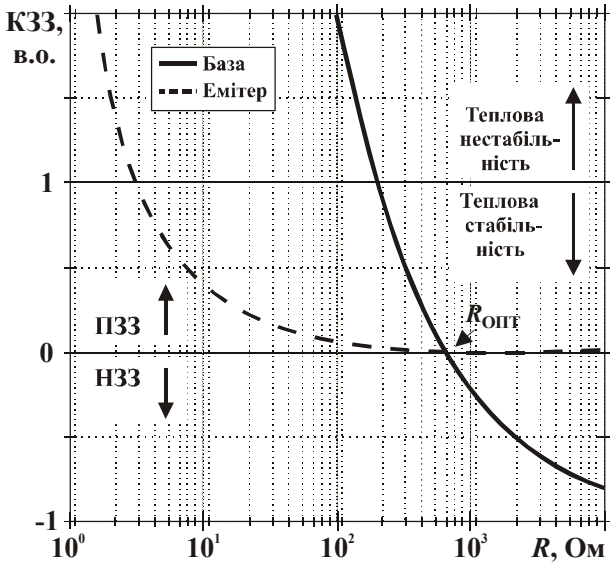

Рис. 3. Залежність коефіцієнту передачі зворотного зв'язку від додаткових опорів у базовій та в емітерній областях.

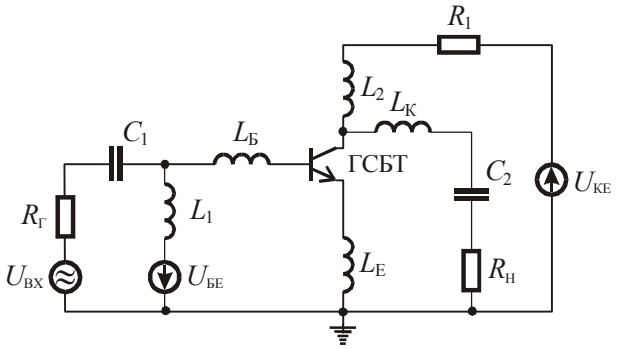

Рис. 4. Схема однокаскадного підсилювача.

Найбільш повне урахування ефекту саморозігріву досягається при комбінованому використанні ПЗЗ і НЗЗ [5,8], що дозволяє запропонувати новий підхід урахування ефекту саморозігріву гетеробіполярної транзисторної структури.

Так як джерело струму, що керується напругою, може еквівалентно бути заміщено джерелом напруги, що керується напругою, то можна зробити припущення, що якби при зміні опору навантаження ЗЗ неперервно змінювався від негативного до позитивного, то при деякому оптимальному значенні опору навантаження $R_{ОПТ}$ глибина ЗЗ зводиться до нуля, це означає, що ефект саморозігріву врахований.

З точки зору електронного кола ЗЗ, електротепловий ЗЗ всередині ГСБТ може бути кількісно описаний за допомогою коефіцієнту передачі зворотного зв'язку [8]:

$$f = \frac{\partial I_К}{\partial T}\cdot\frac{\partial T}{\partial P}\cdot\frac{\partial P}{\partial I_К} = \frac{\partial I_К}{\partial T}R_{th}V_К, \qquad (1)$$

де P – потужність, що розсіюється, [Вт]; T – внутрішня температура пристрою [К].

Коефіцієнт ЗЗ приймає додатні та від'ємні значення, що відповідає додатному та від'ємному ЗЗ. Теплова нестабільність настає при $f > 1$, а ефект саморозігріву може бути врахований при зведенні f до нуля (рис. 3). Але оскільки і R_{th}, і $V_К$ позитивні, то з (1) видно, що знак коефіцієнту ЗЗ визначається співвідношенням $(\partial I_К/\partial T)$.

Коли як кероване джерело використовується ДНКН, розташований у базовій області, струм колектора може бути записаний:

$$I_К = I_S\cdot\exp\left\{\frac{q}{kT_0}\left[V_{БЕ} - I_Б V_Б + \alpha\left(T - T_0\right)\right]\right\}, \qquad (2)$$

де I_S – струм насичення [А]; $I_Б$ і $V_{БЕ}$ – струм бази і напруга база-емітер, відповідно; T_0 – зовнішня температура [К].

Беручи до уваги значення діркової складової струму:

$$I_Р = CI_К\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \qquad (3)$$

струм бази можна виразити через струм колектора наступним чином:

$$I_Б = I_К\Big/в + I_Р = I_К\left[1/в + C\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)\right]. \qquad (4)$$

де ΔE – ефективна різниця у висоті потенційного бар'єру для дірок і для електронів [еВ]; C – відношення струму електронів до струму дірок для $\Delta E = 0$; β – коефіцієнт підсилення струму.

Підставляючи (4) у (2) одержуємо:

$$V_{БЕ} = \frac{kT_0}{q}\ln\frac{I_К}{I_S} + I_К R_Б\left[\frac{1}{\beta} + C\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)\right] - \alpha\left(T - T_0\right), \qquad (5)$$

диференціюючи (5) відносно T і розв'язуючи відносно $\partial I_К/\partial T$ одержуємо:

$$\frac{\partial I_К}{\partial T} = \frac{\alpha - \frac{CI_К R_Б\Delta E}{kT^2}\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)}{\frac{kT_0}{qI_К} + \left[\frac{1}{\beta} + C\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)\right]R_Б} = \frac{\alpha - \frac{\Delta E}{kT^2}R_Б I_Р}{\frac{kT_0}{q} + I_Б R_Б}I_К. \qquad (6)$$

Коефіцієнт передачі ЗЗ набуває вигляду:

$$f = \frac{\alpha - \frac{\Delta E}{kT^2}R_Б I_Р}{\frac{kT_0}{q} + I_Б R_Б}R_{th}I_К V_К, \qquad (7)$$

де перша і друга частини чисельника описують позитивний і негативний ЗЗ у ГСБТ, відповідно.

Дорівнюючи (7) нулю ($f = 0$) одержуємо:

$$R_T = \frac{\alpha T}{CI_К\left(\Delta E/kT\right)}\exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) = \frac{\alpha T}{\left(\Delta E/kT\right)I_Р}. \qquad (8)$$

Залежність коефіцієнту передачі ЗЗ від додаткового опору, розрахованого за формулою (7)

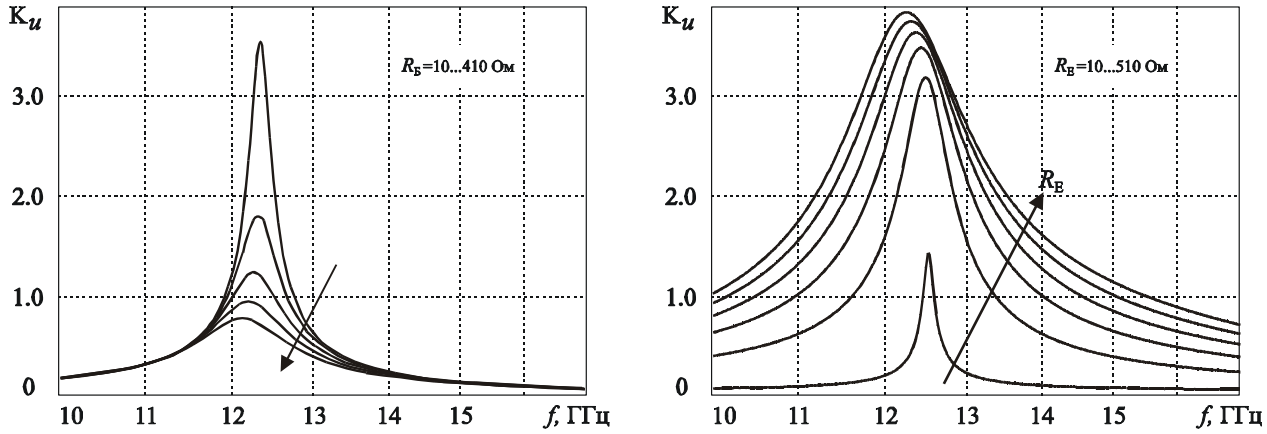

Рис. 5. Залежність коефіцієнту підсилення напруги від частоти при різних значеннях опору бази $R_Б$ і емітера R_E.

наведена на рисунку 3. Коли виконується нерівність $R_Б < R_T$, то ми маємо справу з ПЗЗ, коли $R_Б > R_T$ – НЗЗ, коли $R_Б = R_T$ – ЗЗ відсутній.

Коефіцієнт передачі ЗЗ при наявності додаткових опорів в області бази і в області емітера буде мати наступний вигляд:

$$f = \frac{\alpha - \frac{\Delta E}{kT^2}\left(R_Б + R_E\right)I_P}{\frac{kT_0}{q} + I_Б R_Б + I_Б R_E} R_{th} I_K V_K . \qquad (9)$$

При розрахунках графіків (рисунок 3) відповідні константи формули (9) мали наступні значення: $\alpha = 1,2$ мВ/К; $\Delta E = 0,28$ еВ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $T = 300$ К; $T_0 = 293$ К; $R_{th} = 1300$ К/Вт; $I_K = 40$ мА; $V_K = 3$ В; $C = 5$; $\beta = 100$.

III. Результати моделювання

На рисунку 4 наведена схема однокаскадного підсилювача надвисоких частот, яка складається з індуктивностей $L_Б$ (10 нГн), L_K (10 нГн), L_E (1,49 нГн), що забезпечують узгодження вхідного та вихідного ланцюгів підсилювача; L_1 (1,97 нГн) і L_2 (1 нГн) – індуктивності, що забезпечують фільтрацію у колах живлення; ємності C_1 (1 пФ) і C_2 (1 пФ) на вході та на виході підсилюючої схеми забезпечують фільтрацію сигналу. Активним елементом каскаду є ГСБТ, схема заміщення якого наведена на рисунку 2.

За результатами моделювання частотних характеристик, наведених на рисунках 5а і 5б, можна зробити висновок, що збільшення товщини бази (тобто, збільшення опору $R_Б$ в схемі заміщення ГСБТ) призводить до зміщення частоти посилення з відповідною зміною коефіцієнту посилення по напрузі, а збільшення опору R_E призводить до збільшення коефіцієнту посилення по напрузі.

IV. Висновки

З наведених розрахунків і результатів моделювання, видно, що для адекватного моделювання та урахування ефекту саморозігріву важливим є не тільки опис залежного джерела, що відтворює нелінійні процеси в транзисторі, але і вибір значення баластового опору, що враховує в схемній моделі ГСБТ вплив зазначених ефектів.

Показано ступінь впливу ефектів саморозігріву на вихідні частотні характеристики транзисторного підсилювача надвисоких частот. У режимах роботи транзистора, де ефекти саморозігріву виявляються помітніше, коефіцієнт підсилювання зменшується у всьому діапазоні робочих частот. Варто очікувати також збільшення коефіцієнту шуму ГСБТ як внаслідок впливу ефекту саморозігріву на фізичні процеси в області переходів, так і появою додаткових баластних елементів схемної моделі пасивних областей бази і емітера.

Тимофєєв В.І. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки;
Семеновська О.В. – асистент кафедри фізичної та біомедичної електроніки;
Приходько М.В. – асистент кафедри фізичної та біомедичної електроніки

[1] J.K. Twynam, M. Yagura, K. Kishimoto, T. Kinosada, H. Sato, M. Shimizu. Thermal stabilization of AlGaAs/GaAs power HBT's using n–$Al_xGa_{1-x}As$ emitter ballast resistors with high thermal coefficient of resistance // *Solid-State Electron,* **9**(3), pp. 1657-1661 (1995).

[2] W. Liu, A. Khatibzadeh, J. Sweder, H. Chau. The use of base ballasting to prevent the collapse of current gain in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors // *IEEE Trans. Electron Dev.,* **43**(2), pp. 245-251 (1996).

[3] G. Gao, M. Unlu, D. Blackburn. Emitter ballasting resistor design for current handling capability of AlGaAs/GaAs power heterojunction bipolar transistors // *IEEE Trans. Electron Dev.,* **38**(2), pp. 185-196 (1991).
[4] M.G. Alderstein. Thermal stability of emitter balasted HBT's // *IEEE Trans. Electron Dev.* **45**(2), pp. 1653-1655 (1998).
[5] Q. Zhang, H. Hu, J. Sitch, R. Surridge, J. Xu. A new large signal HBT model // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,* **44**(5), pp. 2001-2009 (1996).
[6] L.L. Liou, J.L. Ebel, C.I. Huang. Thermal efects on the characteristics of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using two-dimentional numerical simulation // *IEEE Trans. Electron Dev.,* **40**, pp. 35-43 (1993).
[7] M.G. Andlerstein. Thermal stability dallasted HBT's // *IEEE Trans. Electron Dev.* **45**, pp. 1653-1655 (1998).
[8] Y. Zhu, J.K. Twynam, M. Yagura. Self-heating effect compensation in HBTs and its analysis and simulation // *IEEE Trans. Electron Dev.,* **48**(11), pp. 2640-2645 (2001).

V. Timofeyev, O. Semenovska, M. Prykhodko

Features of Modeling of Processes of Self-warming-up in the Submicron Heterostructure Transistors

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute",
37, Peremogy Av., Kyiv-056, 03056,
E-mail: timof@ntu-kpi.kiev.ua, sem@phbme.ntu-kpi.kiev.ua

The circuit model of heterojunction bipolar transistor including thermal effect is submitted. The analysis of parameters of circuit model of the transistor was carried out. The criterion of a choice of values ballast resistance is determined. Influence of thermal effect on frequency characteristics of the one-cascade microwave amplifier was shown.