

Рис. 6. Експериментальна функція перетворення

Висновки

Запропоновано електричну схему перетворювача температури на основі сегнетоелектричного конденсатора і транзисторної структури з ВО. На основі методу схемних визначників проведено аналіз основної частини схеми – автогенератора синусоїдальних коливань, внаслідок чого отримано зображення вихідного сигналу пристрою у вікні програми MathCad 11.0. Проведені експериментальні дослідження, завдяки чому отримано ВАХ і функцію перетворення частотного перетворювача температури.

Література

1. Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков / Желудев И. С. – М.: Изд-во "Наука", 1968. – 462 с.
2. Курганов С. А. Анализ установившихся режимов линейных электрических цепей методом схемных определителей: [учеб. пос.] / Курганов С. А. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 148 с.
3. Курганов С. А. Схемно-алгебраическое моделирование и расчет линейных электрических цепей: [учеб. пос.] / Курганов С. А. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 319 с.
4. Осадчук В. С. Генераторы электрических колебаний на основе транзисторных структур с від'ємним опором: [моног.] / Осадчук В. С. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 184 с.

Надійшла 4.3.2011 р.

УДК 621.382

Л.Б. ЛІЩИНСЬКА

Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОХЗАТВОРНОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА У РЕЖИМІ ВІДКРИТОГО ПЕРШОГО І ЗАКРИТОГО ДРУГОГО ПЕРЕХОДІВ

Розроблена математична модель двохзатворного польового транзистора для режиму відкритого першого і закритого другого переходів, у якості якої можливе використання параметрів його невизначеної матриці, для формулювання яких достатньо визначити параметри матриць провідності трьох чотириполюсників, що реалізуються на основі ПТ2.

The mathematical model of two brench-block field transistor is developed for the mode opened first and closed second transitions, in quality of which the possible use of parameters of him indefinite matrix, for determination of which it is enough to define the parameters of matrices of conductivity of three quadripoles which are realized on the basis of FIT2.

Ключові слова: двохзатворний польовий транзистор, матриця провідності.

Вступ

Двохзатворні польові транзистори (ПТ2) можуть забезпечувати реалізацію на одному кристалі напівпровідника двох інформаційних пристроїв (ІП). Наприклад, генератора і змішувача, підсилювача і атенюатора тощо [1,2], що свідчить про їх широкі функціональні можливості. При цьому зазвичай вони використовуються у режимах зворотного зміщення на затворах. Двохзатворні ПТ2 з *p-n* переходами і переходами Шоттки можуть працювати також при прямому зміщенні одного із затворів, що розширює

функціональні можливості такої структури. При проектуванні ІП у цьому режимі не можуть бути використані математичні моделі ПТ2, які розроблені для режимів зворотного зміщення на затворах [3].

Постановка завдання

Метою роботи є розробка математичної моделі двохзатворного польового транзистора для режиму відкритого першого і закритого другого переходів та перевірка її коректності.

Обґрунтування математичної моделі

У режимі, коли відкритий перший і закритий другий перехід ПТ2, його можна представити у вигляді двох транзисторів (рис. 1) [4]: VT1 – інжекційно-пролітного транзистора (ІПТ) [5]; VT2 – однозатворного польового транзистора (ПТ) (рис. 1).

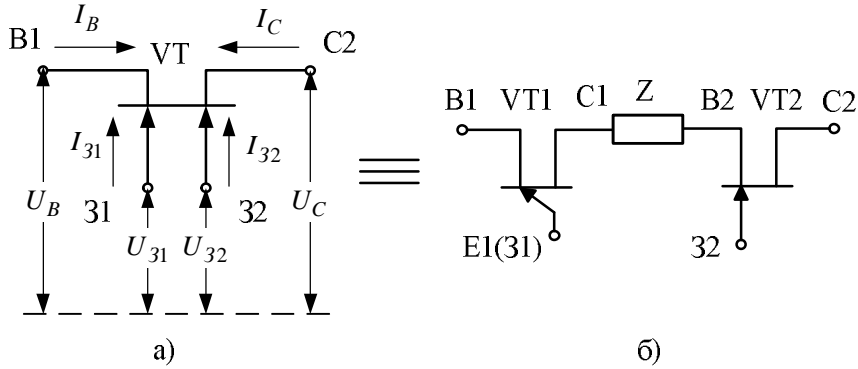


Рис. 1. Тотожне представлення ПТ2 (а) при відкритому першому і закритому другому переходах (б)

Нехтуючи з метою спрощення аналізу елементами корпусу і виводів, а також використовуючи фізичні еквівалентні схеми ІПТ [5] і ПТ [6], отримуємо фізичну еквівалентну схему ПТ2 у режимі, коли перший перехід відкритий, а другий закритий (рис. 2).

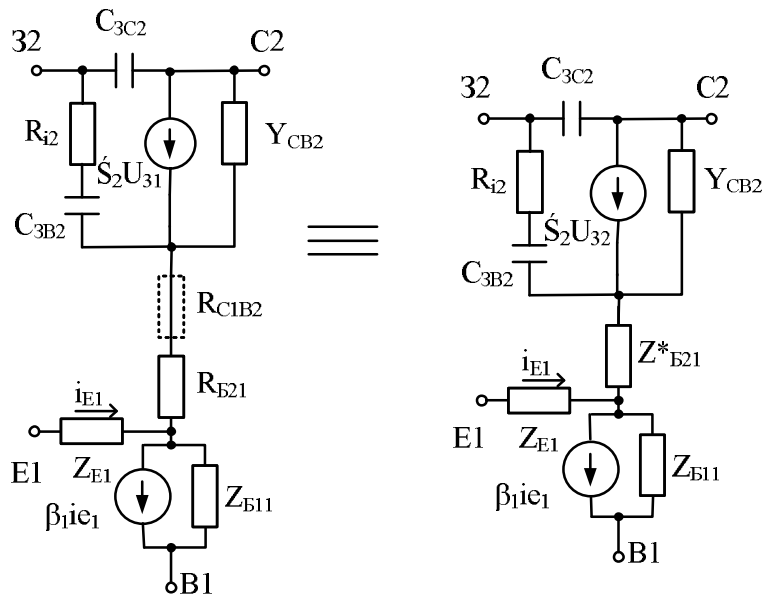


Рис. 2. Малосигнальна фізична еквівалентна схема ПТ2 у режимі відкритого першого і закритого другого переходів

На схемах: R_{i2} і C_{3B2} – диференціальний опір і ємкість між затвором і витоком ПТ; C_{3C2} – ємкість між затвором і стоком ПТ; S_2 – крутизна; Y_{CB2} – провідність каналу ПТ; Z_{E1} – повний опір емітерного переходу ІПТ; Z_{B1} і Z_{B2} – активний і пасивний опори каналу ІПТ; β_1 – коефіцієнт передачі за струмом ІПТ.

Розглядаючи ПТ2 як незалежний чотириполюсник (рис. 1а), зв'язок між струмами i_B , i_C , i_{31} , i_{32} і напругами U_B , U_C , U_{31} , U_{32} його полюсів можна описати рівнянням [7]

$$\begin{bmatrix} i_{31} \\ i_{32} \\ i_C \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{31} \\ U_{32} \\ U_C \\ U_B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Параметри невизначеної матриці провідності $[y_{ij}]$ цього рівняння забезпечують опис більшості малосигнальних параметрів ПТ2 та її можна розглядати як узагальнену математичну модель ПТ2. Враховуючи, що не всі елементи цієї матриці є незалежними, для їх знаходження досить визначити у-параметри ПТ2 лише для трьох схем його включення як чотириполосник, коли два електроди з'єднуються із загальною шиною [7]. Критерієм вибору схеми включення є умова, при якій у шукані матриці повинні входити діагональні елементи невизначеної матриці: $y_{11}, y_{22}, y_{33}, y_{44}$, що забезпечують схеми включення ПТ із загальними електродами: (31, 32); (31, В); (В, С) (рис. 3).

Розрахувавши або вимірявши десять у-параметрів цих чотириполосників можна розрахувати параметри математичної моделі ПТ2, що залишилися, у даному режимі.

Утворюючи їх чотириполосники є з'єднанням ПТ (VT1), включеного за схемою із загальним емітером E1 (рис. 3б), загальним витоком (рис. 3ж) і двухполосник із загальним емітером і витоком E1B1 (рис. 3г), і ПТ (VT2), включеного за схемою із загальним затвором (рис. 3б), загальним витоком (рис. 3г) і оберненою схемою із загальним стоком (рис. 3ж). Вони описуються відповідними матрицями провідності:

$$\begin{bmatrix} y_{PT}^{(B)} \\ y_{PT}^{(B)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(B)} & y_{12}^{(B)} \\ y_{21}^{(B)} & y_{22}^{(B)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{3C} + y_{31} & -y_{3C} \\ -y_{3C} & y_{3C} + y_{CB} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

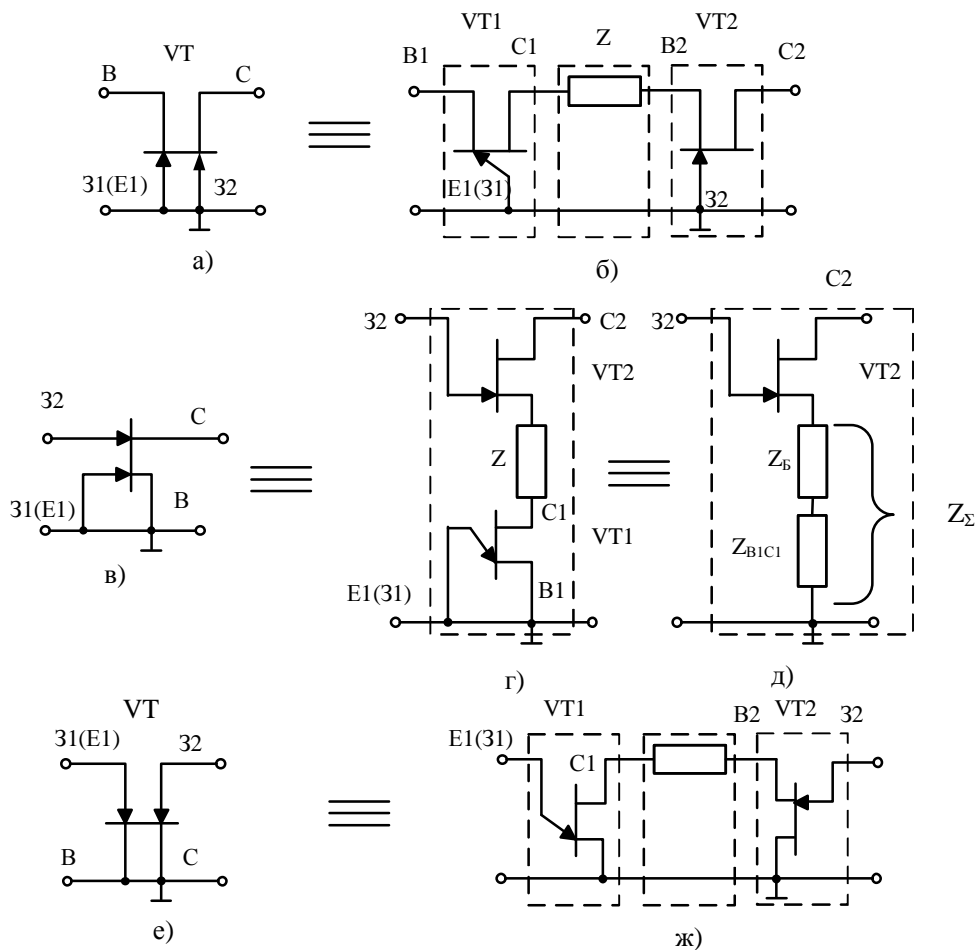


Рис. 3. Тотожне представлення чотириполосників на базі ПТ2 при включенні їх за схемою: (31,32) – а, б; (31,В) – в, г; (В, С) – е, ж при відкритому першому і закритому другому переходах

$$\begin{bmatrix} y_{PT}^{(3)} \\ y_{PT}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(3)} & y_{12}^{(3)} \\ y_{21}^{(3)} & y_{22}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{3B} + y_{CB} + \& & -y_{3C} \\ -y_{3B} - \& & y_{CB} + y_{3C} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} y_{11}^{(C)} & y_{12}^{(C)} \\ y_{21}^{(C)} & y_{22}^{(C)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{3B} + y_{3C} & -y_{3B} \\ -y_{3B} - \mathcal{G} & y_{BC} + y_{3B} + \mathcal{G} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $y_{3C} = j\omega C_{3C}$; $y_{CB} = G + j\omega C_{CB}$; $y_{3B} = (w^2 R_i C_{3B} + j\omega C_{3B}) / (1 + w^2 R_i^2 C_{3B}^2)$.

$$\begin{bmatrix} y_{11}^{(B)} \\ y_{11T}^{(B)} \end{bmatrix} = \Delta Z^{-1} \times \begin{bmatrix} Z_E + Z_{B1}(1 - \mathcal{B}) & -Z_{B1}(1 - \mathcal{B}) \\ -Z_{B1} & R_{B2} + Z_{B1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y_{11}^{(E)} \\ y_{11T}^{(E)} \end{bmatrix} = \Delta Z^{-1} \times \begin{bmatrix} Z_E + R_{B2} & -Z_E \\ -(Z_E - \mathcal{B}Z_{B1}) & Z_E + Z_{B1}(1 - \mathcal{B}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $\Delta Z = Z_E R_{B2} + Z_{B1} [Z_E + R_{B2}(1 - \mathcal{B})]$.

Виключенням є обернена схема із загальним стоком VT2 на рис. 3ж. Для цього чотириполосника матрицю провідності знаходимо з (4), помінявши перехресні елементи матриці.

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_{11}^{(C)} & \bar{y}_{12}^{(C)} \\ \bar{y}_{21}^{(C)} & \bar{y}_{22}^{(C)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{BC} + y_{3B} + \mathcal{G} & -y_{3B} - \mathcal{G} \\ -y_{3B} & y_{3B} + y_{3C} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Враховуючи, що на рис. 3б утворюючі чотириполосники включені каскадно, використовуючи (3) і (6) та здійснивши перехід до $[a]$ -матриць цих чотириполосників, для початкового чотириполосника на рис. 3а маємо

$$[a]_{(E1,32)} = [a_{E1}] \times [a_Z] \times [a_{32}] = \begin{bmatrix} a_{11(E1,32)} & a_{12(E1,32)} \\ a_{21(E1,32)} & a_{22(E1,32)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Здійснивши зворотний перехід від $[a]_{(E1,32)}$ -матриці до матриці провідності знаходимо

$$\begin{bmatrix} y_{11(E1,32)} & y_{12(E1,32)} \\ y_{21(E1,32)} & y_{22(E1,32)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{33} & y_{34} \\ y_{43} & y_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{a_{12(E1,32)}} \begin{bmatrix} a_{22(E1,32)} & -\Delta a_{(E1,32)} \\ 1 & -a_{11(E1,32)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $\Delta a_{(E1,32)}$ – визначник матриці (8).

Для чотириполосника на рис. 3в, матриця провідності буде дорівнювати

$$\begin{bmatrix} y_{11}^{(E1,B)} & y_{12}^{(E1,B)} \\ y_{21}^{(E1,B)} & y_{22}^{(E1,B)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{22} & y_{23} \\ y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} = \Delta Z^{(E1,B)} \times \begin{bmatrix} Z_{22}^{(B2)} - Z_{\Sigma} & Z_{12}^{(B2)} + Z_{\Sigma} \\ Z_{21}^{(B2)} + Z_{\Sigma} & Z_{11}^{(B2)} + Z_{\Sigma} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де $\Delta Z^{(E1,B)}$ – визначник матриці опору чотириполосника на рис. 3в; $Z_{11}^{(B2)}$, $Z_{12}^{(B2)}$, $Z_{21}^{(B2)}$, $Z_{22}^{(B2)}$ – матриця опорів VT2 на рис. 3г, включеного за схемою із загальним витоком; $Z_{\Sigma} = Z + Z_{B1C1}$; $Z_{B1C1} = Z_{22}^{(B1)} + Z_{12}^{(B1)} Z_{21}^{(B1)} / Z_{11}^{(B1)}$; $Z_{11}^{(B1)}$, $Z_{12}^{(B1)}$, $Z_{21}^{(B1)}$, $Z_{22}^{(B1)}$ – елементи матриці опорів VT1, включеного із загальним витоком.

Здійснивши для схеми на рис. 3е перетворення, які проведені для схеми на рис. 3а, знаходимо

$$\begin{bmatrix} y^{(BC)} \\ y_{11}^{(BC)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^{(BC)} & y_{12}^{(BC)} \\ y_{21}^{(BC)} & y_{22}^{(BC)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{a_{12}^{(BC)}} \begin{bmatrix} a_{22}^{(BC)} & -\Delta a^{(BC)} \\ 1 & -a_{11}^{(BC)} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $\Delta a^{(BC)}$ – визначник $[a^{(BC)}]$ -матриці чотириполосника на рис. 3е, ж.

Отримані матриці (9–11) забезпечують розрахунок всіх необхідних елементів у невизначеній матриці рівняння (1) та їх можна розглядати як малосигнальну математичну модель ПТ2 у режимі відкритого першого і закритого другого переходів.

Експериментальна перевірка коректності математичної моделі

Перевірку коректності розробленої математичної моделі ПТ2 можливо здійснити шляхом порівняння розрахункових значень параметрів його імітансних матриць у різних схемах включення з експериментально набутих значень цих параметрів. Враховуючи складність і трудомісткість таких експериментальних досліджень, обраний найпростіший шлях розв'язання цієї задачі за рахунок використання у якості інформаційного параметру $K_{ms} = |W_{21} / W_{12}|$ – малосигнального

максимально–досяжного коефіцієнта передачі чотириполюсника [7]. Достоїнствами цього параметра є:

- інформативність, оскільки він залежить від найважливіших параметрів прямої і зворотної передачі чотириполюсника, кожен з яких, будучи у загальному випадку комплексною величиною, залежить і від їх складових;

- дешевизна і простота вимірів, шляхом виміру лише потужності сигналу, що пройшов через чотириполюсник у прямому P_{Π} і зворотному P_{Π} напрямках: $K_{ms} = \sqrt{P_{\Pi} / P_H}$ [8];

- висока точність вимірів, яка при використанні термістерного моста МЧ-2 на ультрависоких частотах не перевищує 3 %.

Результати вимірювання і розрахунку значень K_{ms} , проведені для досліджуваних чотириполюсників (рис. 3) показали, що на частоті 1 ГГц при використанні ПТ2 типа ЗП328–2, фіксованому значенні замикаючої напруги на другому затворі $U_3 = -1$ і зміні напруги на першому затворі у діапазоні (0 ÷ +1В) відмінність розрахункових та експериментальних значень K_{ms} не перевищує 20 %. Враховуючи статистичний розкид параметрів фізичної еквівалентної схеми ПТ, використовуваних у базі даних пакету прикладних програм проектування електронних пристроїв «Microwave office» [9], і погрішність експерименту, отримані результати слід вважати задовільними, що підтверджує коректність розробленої математичної моделі і можливість її використання при дослідженні електронних схем на основі ПТ2 при прямому зміщенні першого і закритому другому переході.

Висновки

1. У режимі прямого зміщення першого і закритому другому переході, ПТ2 можна представити у вигляді з'єднання інжекційно-пролітного і однозатворного польового транзисторів, коли стік першого з'єднаний з витокком другого.

2. У якості узагальненої математичної моделі ПТ2 у цьому режимі можливе використання параметрів його невизначеної матриці, для формулювання яких достатньо визначити параметри матриць провідності трьох чотириполюсників, що реалізуються на основі ПТ2: із загальними: З1,З2; З1,В; В, С, коли на перший перехід подається пряме, а другий – зворотне зміщення.

Література

1. Егудин А. Б. СВЧ полевые транзисторы с двумя затворами / А. Б. Егудин, В. Г. Еленский, О. В. Чкалова // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – № 6. – С. 80–94.
2. Vendelin G. D. Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques / G.D. Vendelin, A.M.Pavio, U.L.Rohde. – New Jersey: WILEY-INTERSCIENCE, 2005. – 1057p. – ISBN 13 978-0-471-41479-7
3. Schoon M. A novel, bias-dependent small-signal model of the dual-gate MES FET / M. Schoon // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1994. – № 42. – P.212-216.
4. Данилин В. Н. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ / В. Н. Данилин, А. Кушниренко, Г. В. Петров. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
5. Филинюк Н. А. Инжекционно–пролётный транзистор / Н. А. Филинюк, И. В. Булыга // Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе. – Баку: АТУ, 2007. – С. 95–97.
6. Валиев К. А. Применение контакта металл-полупроводник в электронике / К. А. Валиев, Ю. И. Пашинцев, Г. В. Петров. – М.: Сов. Радио, 1981. – 304 с.
7. Филинюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шотткі: [монографія] / М. А. Филинюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 274 с. – ISBN 978-966-641-332-4
8. Филинюк М. А. Метрологічні основи негatronіки: [монографія] / М. А. Филинюк, Д. В. Гаврилов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 188 с. – ISBN 966-641-168-73.
9. Разевиг В. Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью MICROWAVE OFFICE. / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин. – М.: Солон–Пресс, 2003. – 496с. – ISBN 5-98003-089-1.

Надійшла 9.3.2011 р.