

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРЕАКТИВНОГО ЭФФЕКТА БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУР И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В.С. Осадчук, А.В. Осадчук

*Кафедра электроники, Винницкий государственный технический университет
Хмельницкое шоссе, 95, 21021 Винница, Украина*

Введение

На современном этапе развития науки и техники информационные технологии занимают ведущее место в развитии общества и их роль неуклонно возрастает. Сами информационные технологии и системы автоматизации не могут существовать без первичных преобразователей информации, с помощью которых осуществляется управление технологическими процессами. Однако интегральные характеристики существующих первичных преобразователей, как элементов автоматики и информационной техники, не отвечают современным требованиям. Поэтому использование микроэлектронной технологии при разработке первичных преобразователей и использование частоты в качестве информативного параметра в широком диапазоне частот, а также новых физических явлений в полупроводниках позволяют значительно улучшить характеристики первичных преобразователей и их экономические показатели. Одним из перспективных научных направлений в разработке первичных частотных микроэлектронных преобразователей является использование реактивных свойств и отрицательного сопротивления полупроводниковых приборов для создания первичных микроэлектронных частотных преобразователей [1,2,3].

В данной работе представлены исследования, которые определяют температурную зависимость полного выходного сопротивления биполярных транзисторов. Показано, что данные зависимости можно использовать для создания первичных микроэлектронных частотных преобразователей, рассчитаны функции преобразования и уравнения чувствительности, выполнены экспериментальные исследования.

Термоактивный эффект в биполярных транзисторах

Под термоактивным эффектом понимают зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления на электродах эмиттер-коллектор биполярного транзистора от температуры, так как он выступает в качестве термочувствительного элемента в

частотных преобразователях. Для определения в аналитическом виде данной зависимости необходимо решить уравнение переноса, которое для электронов и дырок имеет вид [4]

$$\frac{1}{D_n} \frac{dn}{dt} = \nabla^2 n + \frac{\bar{l}_{En}}{L_n^2} \nabla n + \frac{C_n}{L_n^2} n + F_n, \quad (1)$$

$$\frac{1}{D_p} \frac{dp}{dt} = \nabla^2 p - \frac{\bar{l}_{Ep}}{L_p^2} \nabla p - \frac{C_p}{L_p^2} p + F_p, \quad (2)$$

де $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$, $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$, $\bar{l}_{En} = \tau_n \mu_n \bar{E}$,

$\bar{l}_{Ep} = \tau_p \mu_p \bar{E}$, $C_n = \tau_n \mu_n \text{div} \bar{E} - 1$, $F_n = G_n / D_n + n_0 / L_n^2$,

$C_p = \tau_p \mu_p \text{div} \bar{E} + 1$, $F_p = G_p / D_p + p_0 / L_p^2$,

L_n, L_p - диффузионная длина электронов и дырок;

D_n, D_p - коэффициент диффузии электронов и дырок;

τ_n, τ_p - время жизни электронов и дырок; G_n, G_p - скорость генерации электронов и дырок; E - напряженность электрического поля в базовой области; n_0, p_0 - равновесная концентрация электронов и дырок.

Уравнения (1) и (2) не имеет аналитического решения, поэтому их стараются упростить, в первую очередь рассматривая стационарный случай, когда $dn/dt = 0$ и $dp/dt = 0$, в одномерном приближении.

Для этого случая уравнения переноса (1) и (2) принимают вид

$$\frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{l_{En}}{L_n^2} \frac{dn}{dx} + \frac{C_n}{L_n^2} n + F_n = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{l_{Ep}}{L_p^2} \frac{dp}{dx} - \frac{C_p}{L_p^2} p + F_p = 0, \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) принадлежат к классу канонических неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка, которые описываются общей формулой [4]

$$\frac{d^2 N}{dx^2} + A_N \frac{dN}{dx} + B_N N + F_N = 0, \quad (5)$$

где N - неравновесные концентрации электронов или дырок; A_N, B_N, F_N - соответствующие коэффициенты уравнений (3) и (4). Уравнение (5) описывает процессы переноса носителей заряда через п-р-п и р-п-р структуры. Если коэффициенты A_N и B_N не зависят от концентрации носителей заряда, то уравнение (5) имеет общее аналитическое решение, вид которого зависит от дискриминанта уравнения $D_N^2 = A_N^2 - 4B_N$.

Для получения аналитического решения уравнения (5) для транзистора типа р-п-р вводят следующие упрощения:

- транзистор работает при низких уровнях инжекции, что соответствует отсутствию электрического поля в базовой области;
- электрический ток через транзистор переносится диффузным путем, то есть дрейфовая составная тока равна нулю;
- роль основных носителей в областях эмиттера, базы и коллектора состоит в обеспечении квазинейтральности, что соответствует поддержанного стационарного распределения объемного заряда в этих областях;
- ток, протекающий через р-п переход, зависит только от потока неосновных носителей в областях, которые образуют данный переход;
- концентрация примесных атомов в коллекторной области считается постоянной, поэтому напряженность электрического поля в данной области равна нулю.

С учетом этих упрощений уравнение переноса (4) для переменного тока примет вид [5]

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} - \frac{p_1(1 + j\omega\tau_p)}{L_p^2} = 0, \quad (6)$$

где p_1 - концентрация инжектированных дырок, обусловленных переменным напряжением; ω - круговая частота. Решение уравнения (6) для переменного тока представлено в работе [5]. На основании этого решения определяются переменные токи эмиттера и коллектора, с помощью которых находятся полное сопротивление базовой области транзистора, которые описываются формулой

$$Z_B = \frac{U_{\delta 1}^* L_p kT}{C_{\delta}^* q^2 D_p} \left\{ S_E \left[p_n e^{\frac{q}{kT} U_{E0}} \frac{q}{kT} U_{E1} \operatorname{cth} \left(\frac{C_{\delta}^* W}{L_p} \right) - p_n e^{\frac{q}{kT} U_{K0}} \frac{q}{kT} U_{K1} \operatorname{csch} \left(\frac{C_{\delta}^* W}{L_p} \right) \right] - S_K \left[p_n e^{\frac{q}{kT} U_{E0}} \frac{q}{kT} U_{E1} \operatorname{csch} \left(\frac{C_{\delta}^* W}{L_p} \right) - p_n e^{\frac{q}{kT} U_{K0}} \frac{q}{kT} U_{K1} \operatorname{cth} \left(\frac{C_{\delta}^* W}{L_p} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где $U_{\delta 1}^*$ - переменное напряжение на базовой области транзистора; T - температура; U_{E1}, U_{K1} - переменное

напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах; U_{E0}, U_{K0} - постоянное напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах; $C_B^* = \sqrt{1 + j\omega\tau_p}$; p_n - концентрация неосновных носителей заряда (дырок) в базовой области; W - толщина базы; S_E, S_K - площадь эмиттерного и коллекторного переходов.

Уравнение (7) является основным в определении зависимости параметров биполярного транзистора от температуры, однако в реальных структурах необходимо учесть влияние температуры на те элементы эквивалентной схемы, которые не входят в активную зону кристалла транзистора. Зависимость полного выходного сопротивления биполярного транзистора от температуры с учетом (7) и использованием обозначений (рис.4) описывается выражением

$$Z_{KB} = \left[U_2 \left(A_1 A_2 \left(A_4 - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} \right) + \frac{A_1}{\omega^2 C_{bc}^2(T)} - A_2 R_b^2(T) - A_3^2 \left(A_4 - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} \right) + j \frac{2A_3 R_b(T)}{\omega C_{bc}(T)} \right) \right] / \left[\left(A_4 - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} \right) \times A_1 \left(j \frac{I_{p1}}{\omega C_{bc}(T)} - A_4 I_{p2} \right) + A_1 (U_2 - I_{p1} A_5) + j \frac{R_b(T) \left(U_1 - I_{p1} \left(\frac{1}{j\omega C_{bc}(T)} + R_b(T) \right) \right)}{\omega C_{bc}(T)} - A_3 R_b(T) \left(j \frac{I_{p1}}{\omega C_{bc}(T)} - A_4 I_{p2} \right) - R_b^2(T) \times (U_2 - I_{p1} A_5) - \left(A_4 - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} \right) \times A_3 \left(U_1 - I_{p1} \left(R_b(T) - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} \right) \right) \right], \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= Z_{R1} + R_b' + j\omega L_b + R_b(T) - j \frac{1}{\omega C_{be}(T)} + R_e(T) + R_e' + j\omega L_e, \\ A_2 &= R_c(T) + R_c' + j\omega L_c - j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} - j \frac{1}{\omega C_{be}(T)} + R_e(T) + R_e' + j\omega L_e, \\ A_3 &= R_e(T) + R_e' + j\omega L_e - j \frac{1}{\omega C_{be}(T)}, \\ A_4 &= R_b(T) - j \frac{1}{\omega C_{bx}(T)}, \quad A_5 = -j \frac{1}{\omega C_{bc}(T)} - j \frac{1}{\omega C_{be}(T)}, \\ I_{p1} &= I_{be2}(T) + I_{be1}(T) / \beta_F(T) + (I_{be1}(T) - I_{bc1}(T)) / Q_b - I_{bc2}(T) - I_{bc1}(T) / \beta_R(T), \end{aligned}$$

$$I_{p2} = I_{bc2}(T) + I_{bc1}(T) / \beta_R(T) - (I_{be1}(T) - I_{bc1}(T)) / Q_b - I_{be1}(T) / \beta_F(T) - I_{be2}(T).$$

В соответствии с формулой (8) на персональном компьютере рассчитаны зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления биполярного транзистора от температуры, которые представлены на рис.1. Как видно из графика, изменение реактивной составляющей от температуры составляет $0,7 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, что создает предпосылки для практической реализации частотных микронных первичных преобразователей температуры на этом эффекте.

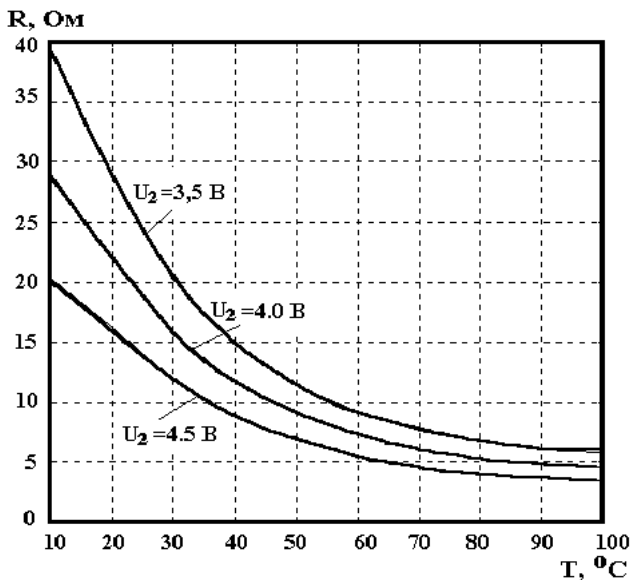


Рис.1. Зависимость активной составляющей полного сопротивления биполярного транзистора от температуры

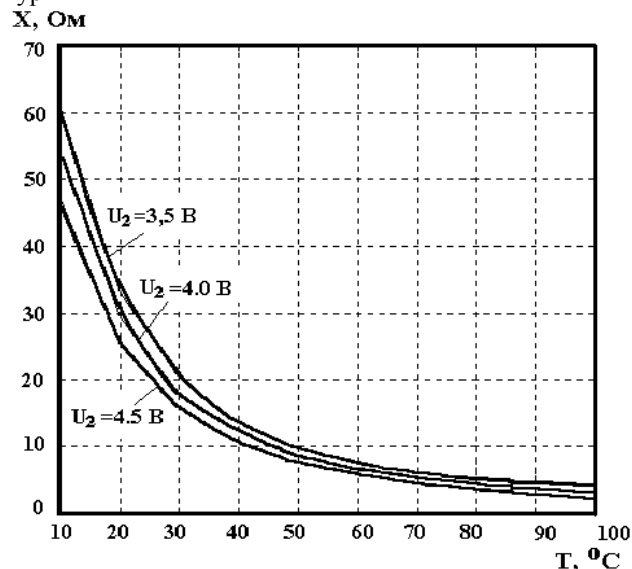


Рис.2. Зависимость реактивной составляющей полного сопротивления биполярного транзистора от температуры

Экспериментальные исследования

Выполнение температурного преобразователя в виде интегральной схемы требует использования пле-

ночной технологии для изготовления пассивного индуктивного элемента в виде спирали, ее добротность имеет небольшое значение [6, 7] и размеры на частотах до 10^6 Гц несовместимы с размерами интегральной схемы преобразователя, поэтому для решения этой проблемы предложено использовать индуктивный характер полного сопротивления биполярного транзистора с RC-цепью [1]. Итак, схема частотного преобразователя температуры с активным индуктивным элементом представлена на рис.3. Термочувствительные биполярные транзисторы VT1, VT2 и VT3 реализуют генератор электрических колебаний, в котором колебательный контур образован емкостной составляющей полного сопротивления на электродах коллектор-коллектор термочувствительных биполярных транзисторов VT1 и VT2 и индуктивной составляющей полного сопротивления на электродах эмиттер-коллектор термочувствительного биполярного транзистора VT3.

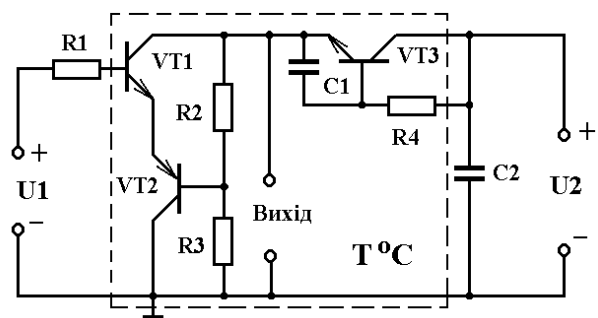


Рис.3. Схема частотного преобразователя температуры

Таким образом, при действии температуры на термочувствительные транзисторы VT1, VT2 и VT3 изменяется как емкость, так и индуктивность колебательного контура генератора, что значительно повышает чувствительность и точность измерения температуры, при этом такая схема преобразователя полностью реализуется в виде интегральной схемы.

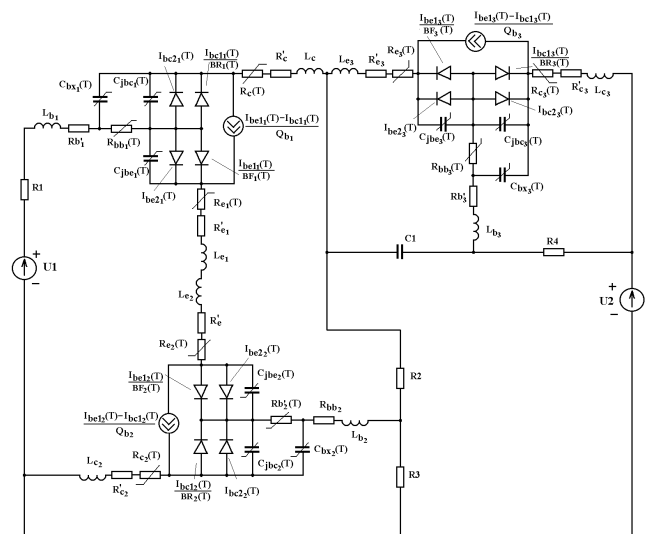


Рис.4. Эквивалентная схема преобразователя. Зависимость параметров эквивалентной схемы биполярных транзисторов VT1, VT2 и VT3, которые образуют емкость и индуктивность колебательного кон-

тура от действия температуры, рассмотрена в работах [8, 9, 10, 11].

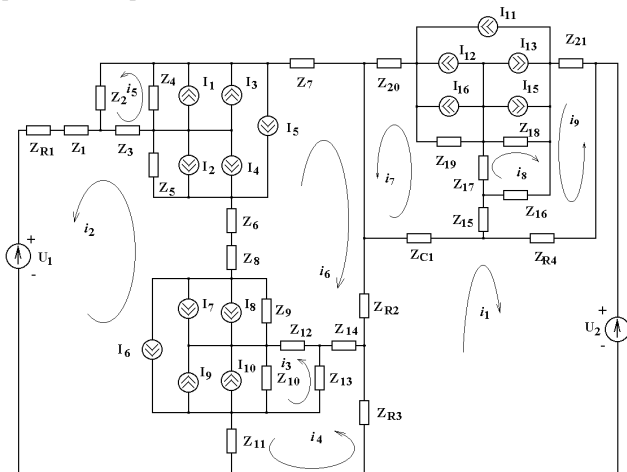


Рис.5. Превращенная эквивалентная схема

Эквивалентная схема преобразователя, которая содержит элементы, зависящие от действия температуры, представлена на рис.4. Для удобства расчетов превратим ее в более компактную (рис.5). Система уравнений Кирхгофа, согласно рис.5, имеет вид

$$\begin{aligned}
 U_2 &= (Z_{R3} + Z_{R2} + Z_{C1} + Z_{R4})i_1 + Z_{R3}i_4 - Z_{R2}i_6 + \\
 &+ Z_{C1}i_7 + Z_{R4}i_9, \\
 U_1 &= (Z_{R1} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11})i_2 + \\
 &+ Z_3(I_5 - i_5 - I_1 - I_3) + Z_5(I_2 + I_4 + I_5 + i_6) + Z_6i_6 + Z_8i_6 + \\
 &+ Z_9(i_6 + I_8 + I_7 + I_6) + Z_{10}(-i_3 - I_{10} - I_9 + I_6) - Z_{11}i_4, \\
 0 &= (Z_{10} + Z_{13} + Z_{12})i_3 - Z_{10}i_2 + Z_{10}I_{10} + Z_{10}I_9 - Z_{10}I_6 + \\
 &+ Z_{13}(I_6 - i_4 - I_{10} - I_9) + Z_{12}i_6 - Z_{12}I_{10} - Z_{12}I_9 + Z_{12}I_6, \\
 0 &= (Z_{R3} + Z_{14} + Z_{13} + Z_{11})i_4 + Z_{R3}i_1 + Z_{14}i_6 - \\
 &- Z_{13}i_3 + Z_{13}I_9 + Z_{13}I_{10} - Z_{13}I_6 - Z_{11}i_2, \\
 0 &= (Z_3 + Z_4 + Z_2)i_5 - Z_3i_2 + Z_3I_1 + Z_3I_3 - Z_3I_5 + Z_4i_6 - \\
 &- Z_4I_1 - Z_4I_3 + Z_4I_5 + Z_2I_1 + Z_2I_3 - Z_2I_5, \\
 0 &= (Z_{R2} + Z_{14} + Z_{12} + Z_9 + Z_8 + Z_6 + Z_5 + Z_4 + Z_7)i_6 - Z_{R2}i_1 + \\
 &+ Z_{14}i_4 + Z_{12}(i_3 - I_9 - I_{10} + I_6) + Z_8i_2 + Z_6i_2 + Z_5i_2 + Z_9(i_2 + \\
 &+ I_8 + I_7 + I_6) + Z_5(I_4 + I_2 + I_5) + Z_4(i_5 - I_1 - I_3 + I_5), \\
 0 &= (Z_{C1} + Z_{15} + Z_{17} + Z_{19} + Z_{20})i_7 + Z_{C1}i_1 - Z_{15}i_9 + Z_{17}i_8 - \\
 &- Z_{17}I_{11} + Z_7I_{13} + Z_{17}I_{15} - Z_{19}I_{14} - Z_9I_{12} - Z_{19}I_{11}, \\
 0 &= (Z_{18} + Z_{17} + Z_{16})i_8 - Z_{18}I_{13} - Z_{18}I_{15} + Z_{18}I_{11} + Z_{17}i_7 + \\
 &+ Z_{17}I_{15} + Z_{17}I_{13} - Z_{17}I_{11} + Z_{16}i_9 + Z_{16}I_{15} + Z_{16}I_{13} - Z_{16}I_{11}, \\
 0 &= (Z_{21} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{R4})i_9 + Z_{16}(i_8 + I_{15} + I_{13} - I_{11}) - \\
 &- Z_{15}i_7 + Z_{R4}i_1,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $I_1 = I_{bc2}(T)$; $I_2 = I_{be2}(T)$; $I_3 = I_{bc1}(T) / \beta_R(T)$; $I_4 = I_{be1}(T) / \beta_F(T)$; $I_5 = (I_{be1}(T) - I_{bc1}(T)) / Q$; $Z_{R1} = R_1$; $I_1 = I_{10} = I_{15}$; $I_2 = I_8 = I_{14}$; $I_3 = I_9 = I_{13}$; $I_4 = I_7 = I_{12}$; $I_5 = I_6 = I_{11}$; $Z_{R2} = R_2$; $Z_{R3} = R_3$; $Z_1 = R_b' + j\omega L_b$; $Z_2 = -j / \omega C_{bc}(T)$; $Z_3 = R_{bb}(T)$; $Z_4 = -j / \omega C_{jbc}(T)$; $Z_5 = -j / \omega C_{jbe}(T)$; $Z_6 = R_e' + R_e(T) + j\omega L_e$; $Z_7 = R_c' + R_c(T) + j\omega L_c$; $Z_1 = Z_{14} = Z_{15}$; $Z_2 = Z_{13} = Z_{16}$;

$$\begin{aligned}
 Z_3 &= Z_{12} = Z_{17}; & Z_4 &= Z_{10} = Z_{18}; & Z_5 &= Z_9 = Z_{19}; \\
 Z_6 &= Z_8 = Z_{20}; & Z_7 &= Z_{11} = Z_{21}.
 \end{aligned}$$

Значение параметров элементов эквивалентной схемы (рис.4) для теоретических расчетов получены из работ [12,13]. Решение системы уравнений (9) проведено численным методом на персональном компьютере типа "Pentium". Влияние температуры на эквивалентные емкость и индуктивность колебательного контура передается через изменение параметров элементов эквивалентной схемы. Функция преобразования получена методом Ляпунова на основании уравнения (9) и описывается выражением

$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L_{екв}(T)}}, \tag{10}$$

Чувствительность частотного преобразователя температуры определяется на основе (10)

$$\begin{aligned}
 S_T &= \frac{\sqrt{2}}{4} \left[\frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} + \frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T} - \frac{(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L_{екв}(T)} \right] \times \\
 &\times \frac{\left(\frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)^2 C_{jbc}(T)L_{екв}(T)} - \frac{(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T)) \left(\frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)^2 L_{екв}(T)} - \\
 &- \frac{(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T)) \left(\frac{\partial L_{екв}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)^2 L_{екв}(T)} \Bigg/ \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L_{екв}(T)}}} \tag{11}
 \end{aligned}$$

Теоретическая и экспериментальная зависимости частоты генерации от температуры представлены на рис.5. Чувствительность частотного преобразователя составляет (2-9) кГц/°С. Экспериментальные исследования проводились по стандартной методике [14].

F_0 , кГц

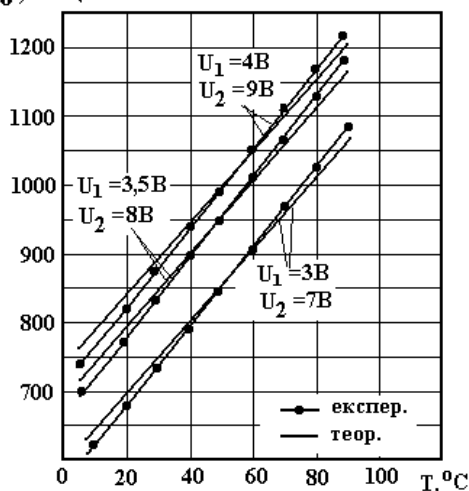


Рис.5. Теоретические и экспериментальные зависимости частоты генерации от температуры

Выводы

1. Показано, что термореактивный эффект в биполярных транзисторах можно использовать для построения частотных микроэлектронных первичных преобразователей температуры, так как зависимость реактивной составляющей полного сопротивления от температуры составляет $0,7 \text{ Ом}/^{\circ}\text{C}$.

2. Предложена схема микроэлектронного частотного первичного преобразователя температуры, в котором емкостной и индуктивный элементы колебательного контура являются активными и зависят от температуры. Получены в аналитическом виде функция преобразования и уравнение чувствительности, которые экспериментально проверены. Чувствительность преобразователя температуры составляет $(2-9) \text{ кГц}/^{\circ}\text{C}$.

Литература

- Осадчук В.С., Осадчук А.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. –Винница: «Универсум-Винница», 1999. – 275с.
- Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением. –Винница: Континент, 1998. – 130с.
- Осадчук А.В. Микроэлектронные частотные преобразователи на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. –Винница: «Универсум-Винница», 2000. – 303 с.
- Буджак Я.С. К вопросу о новом методе в теории кинетических свойств кристаллов // Вестник национального университета “Львовская политехника”. Элементы теории и приборы твердотельной электроники. –2001. –№427. – С.10-13.
- Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. –М.: Советское радио, 1977. – 230с.
- Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. –М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
- Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – Г.: Радио и связь, 1992. –320 с.
- Осадчук В.С., Осадчук А.В. Математическая модель частотного преобразователя температуры // Elektronika ir Elektrotechnika. – Kaunas. –2000. – №3(26). Г.33-38.
- Осадчук А.В. Математическая модель температурного преобразователя на основе транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением // Вестник Винницкого политехнического института. –1999. –№3. –С.81-86.
- Осадчук А.В. Математическая модель тепловых режимов микроэлектронных частотных преобразователей // Вестник Винницкого политехнического института. –2001. –№4. – С.90-94.
- Осадчук А.В. Математическая модель частотного преобразователя температуры на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 1999. –№4. –С.49-53.
- Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 3. Моделирование аналоговых устройств. –М.: Радио и связь, 1992. –120 с.
- Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
- Мирский Г.Я. Электронные измерения. –М.: Радио и связь, 1986. –439 с.



Born in 1938, Yaroslavl. Engineer (1962) Kiev Polytechnic Institute, Doctor (1966), Habil Doctor (1979). Professor, Academician of Academy of Engineering Sciences of Ukraine, author of more than 350 proceedings, including 2 monographs, 3 textbooks, 100 patents for the inventions. Head of the Department of electronics of Vinnitsa State Technical University (Ukraine).

Office address: Vinnitsa State Technical University, Chmelnytskyi Road 95, 21021 Vinnitsa, Ukraine; phone 380 432 440013, e-mail: osa@lili.vstu.vinnica.ua

Prof. Vladimir Stepanovich Osadchuk



Born 1969 in Vinnitsa. Engineer of electronic technology (1993). Doctor (1996). The author of 100 proceedings, including 3 monographs and 30 patents for inventions. The senior scientific employee at the department of electronics of Vinnitsa State Technical University (Ukraine).

Office address: Vinnitsa State Technical University, Chmelnytskyi Road 95, 21021 Vinnitsa, Ukraine; phone 380 432 440833, e-mail: osa@lili.vstu.vinnica.ua

**Assoc. Prof.
Alexandr Vladimirovich Osadchuk**