

Л.Б. ЛИЩИНЬКА, канд. техн. наук., доц. ВТЕІ КНТУ, м.Вінниця
М.В. БАРАБАН, аспірант ВНТУ, м. Вінниця
Р.Ю. ЧЕХМЕСТРУК, студент, ВНТУ, м. Вінниця
М.А. ФІЛІНЬОК, д-р техн. наук, проф. ВНТУ, м.Вінниця

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ЕКВІВАЛЕНТА ІНДУКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ ОДНОПЕРЕХІДНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Проведена оцінка характеру температурної залежності параметрів фізическої еквівалентної схеми одноперехідної транзисторної структури, проаналізована температурна стабільність еквівалента індуктивності.

The estimation of the nature of temperature dependence of parameters of physical equivalent circuit unijunction transistor structure was made, temperature stability of the equivalent inductance was analyzed.

Одною з проблем мікроелектроніки є створення напівпровідникової індуктивності, яка відповідає вимогам технологічності і має високе значення індуктивності, добротності і стабільності. На низьких частотах ця проблема вирішується схемотехнічними методами, наприклад, використанням гіраторів у [1]. На ультрависоких та надвисоких частотах реалізуються напівпровідникові аналоги індуктивності на основі біполярних і польових транзисторів. При цьому для отримання високої добротності використовуються або складові транзистори, або лавинний режим роботи біполярного транзистора [2, 3]. Спільним недоліком цих рішень є низька температурна стабільність транзисторних еквівалентів індуктивності. Використання одноперехідної транзисторної структури (ОТС) у вигляді одноперехідного транзистора (ОТ) дозволяє використовувати тільки один транзистор в активному режимі [4], що є передумовою отримання більш високих значень його стабільності, у порівнянні з вище розглянутими технологічними рішеннями.

Виходячи з цього, в роботі поставлено задачі дослідження стабільності еквівалента індуктивності на основі ОТ (див. рис. 1, а) та оцінку відносної стабільності еквівалентів індуктивності на основі лавинних і складових транзисторів.

1. Оцінка характеру температурної залежності параметрів фізическої еквівалентної схеми ОТС. Температурна стабільність напівпровідникового еквівалента індуктивності оцінюється температурним коефіцієнтом індуктивності [5]:

$$S_T^L = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} 100\% [\text{град}^{-1}],$$

де ΔL – приріст еквівалентна індуктивність, ΔT – приріст температури.

Для розрахунку цього коефіцієнта в діапазоні температури та частоти, використано фізичну еквівалентну схему ОТС (рис. 1, б) [6]:

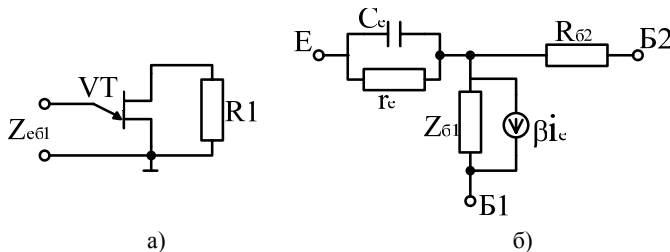


Рисунок 1 – Високочастотна (а) і фізична еквівалентна (б) схеми ОТС: r_c і C_c – диференційний опір і ємність емітерного переходу, $Z_{б1}$ і $R_{б2}$ – диференційний і омичний опір бази, β – високочастотний коефіцієнт передачі ОТС по струму

На схемі не враховано елементи корпусу і виводів, які в розглянутому діапазоні частот не впливають на температурну стабільність транзисторного еквівалента індуктивності.

Диференційний опір емітерного переходу залежить як від температури, так і від струму емітера, який пропорційний напрузі живлення:

$$r_e = \frac{kT}{qI_e}; \quad I_e = U_{жс} / R_e, \quad (1)$$

де k – стала Больцмана, q – заряд, R_e – резистор в колі між шиною живлення та емітером.

З формули (1) слідує, що r_e росте пропорційно температурі.

Так як емітерний перехід в більшості випадків є плавним, то залежність його ємності від температури описується виразом:

$$C_e = S_e \sqrt{\frac{N_e \epsilon \epsilon_0 q}{2(U_e + \phi_T)}} \left/ \left(1 + \frac{\ln q [kT(U_e + \phi_T) - 1]}{qkT(U_e + \phi_T)} \right) \right., \quad (2)$$

де N_e – концентрація донорних домішок емітерного переходу; ϵ, ϵ_0 – діелектричні сталі; $\phi_T = kT$ – дифузійний потенціал; U_e – напруга на емітерному переході; S_e – площа емітерного переходу.

Аналіз формули (2) показує, що ємність емітерного переходу змінюється пропорційно температурі.

Омичний опір пасивної області бази $R_{б2}$ збільшується пропорційно з ростом температури і як в біполярному транзисторі може бути апроксимований виразом:

$$R_{б2}(T) = R_{б2}(T_o) + 0,03(T - T_o),$$

де $R_{\sigma 2}(T_o)$ – опір пасивної області бази при температурі T_o . Він пропорційний $1/(qn\mu_n)n$ і росте з збільшенням температури внаслідок зменшення рухливості електронів μ_n .

Низькочастотне значення коефіцієнта передачі по струму $\beta_o = \gamma\beta_i(1 + \mu_n/\mu_p)$, де γ – коефіцієнт інжекції емітерного переходу; β_i – коефіцієнт переносу в область бази; μ_n і μ_p – рухливість електронів і дірок.

Коефіцієнт інжекції γ з ростом температури зменшується, що пояснюється ростом концентрації електронів в базу і збільшенням електронного струму емітерного переходу.

Коефіцієнт переносу β_n залежить як від рухливості μ_n так і часу життя електронів в базі τ , які в некомпенсованих напівпровідниках, близьких до власних, з ростом температури зменшуються. Причому μ_n в більшій ступені ніж τ , що приводить до зменшення β_n . В результаті з ростом температури β_o також зменшується.

Гранична частота ОТС розраховується в припущенні, що час прольоту носіїв через базу $\tau_2 \ll \tau_{pe}$, що дозволяє знехтувати рекомбінацією носіїв в базі рахувати тільки дрейфовий характер переносу носіїв, визначається виразом $f_\beta \approx 0.44/\tau_2$. З ростом температури τ_2 росте, що призводить до незначного зменшення f_β .

Опір активної області бази між емітером і омичним контактом першої бази:

$$Z_{\sigma 1} = 1/Y_{\sigma 1} = 1/(\text{Re}Y_{\sigma 1} + j \text{Im}Y_{\sigma 1}),$$

$$\text{де } \text{Re}Y_{\sigma 1} = \frac{M}{R_{\sigma 1}} \cos(\varphi + \theta); \text{Im}Y_{\sigma 1} = \frac{M}{R_{\sigma 1}} \sin(\varphi + \theta); M = \sin(\theta/\theta);$$

$\theta = \omega\tau_1/2$, де τ_1 – час прольоту електроном активної області бази, θ – кут прольоту активної області бази.

На відносно низьких частотах, де $\Omega_\beta \ll 1$, $\Omega_\beta = f/f_\beta$, приймаємо $(\varphi + \theta) \approx 0$, $\text{Re}Y_{\sigma 1} \approx R_{\sigma 1}$, а $\text{Im}Y_{\sigma 1} \approx 0$.

При цьому враховуючи, що з ростом температури струм емітера залишається постійним, а U_e зменшується, область бази під емітером розширюється і $R_{\sigma 1}$ зменшується.

З ростом частоти $(\varphi + \theta)$ починає рости і проявляється ємнісна складова провідності активної області бази, яка характеризується ємністю:

$$C_{\sigma 1} = \frac{M}{R_{\sigma 1}\omega} \sin(\varphi + \theta).$$

Враховуючи, що з ростом температури відбувається зниження рухливості електронів, в результаті маємо збільшення τ_1 , θ і M , що приводить до росту $C_{\beta 1}$.

2. Аналіз температурної нестабільності еквівалента індуктивності.

Використовуючи фізичну еквівалентну схему ОТС і однополюсну апроксимацію для частотної залежності коефіцієнта передачі по струму $\dot{\beta} = \beta_o / (1 + j\Omega\beta_o)$, визначено для діапазону частот, де $\Omega\beta_o^2 \ll 1$, $\beta_o > 1$ вираз для повного опору транзисторного еквівалента індуктивності на основі ОТС:

$$Z_{e\beta 1} = Z_e + Z_B(1 - \dot{\beta}).$$

Звідки:

$$\text{Re } Z_{e\beta 1} = Z_{e1} - Z'_B(\beta_o - 1) + Z''_B\Omega\beta_o; \quad (3)$$

$$\text{Im } Z_{e\beta 1} = -Z_{e2} + Z'_B\Omega\beta_o + Z''_B(\beta_o - 1), \quad (4)$$

де $Z_{e1} = r_e / [1 + (\omega C_e r_e)^2]$; $Z_{e2} = \omega C_e r_e / [1 + (\omega C_e r_e)^2]$;

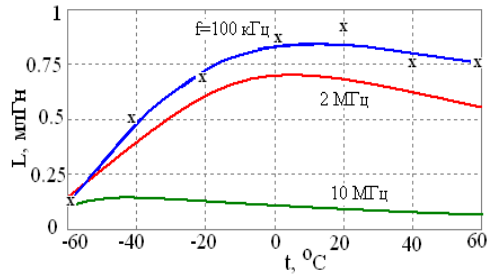
$$Z'_B = \frac{R_{\beta 1} R_{\beta 2} (R_{\beta 1} + R_{\beta 2})}{(R_{\beta 1} + R_{\beta 2})^2 + (\omega C_{\beta 1} R_{\beta 1} R_{\beta 2})^2}; \quad Z''_B = \frac{\omega C_{\beta 1} R_{\beta 1} R_{\beta 2}}{(R_{\beta 1} + R_{\beta 2})^2 + (\omega C_{\beta 1} R_{\beta 1} R_{\beta 2})^2}.$$

На основі (3) і (4) отримано аналітичні вирази для еквівалентної індуктивності $L_{EB1} = \text{Im } Z_{e\beta 1} / \omega$.

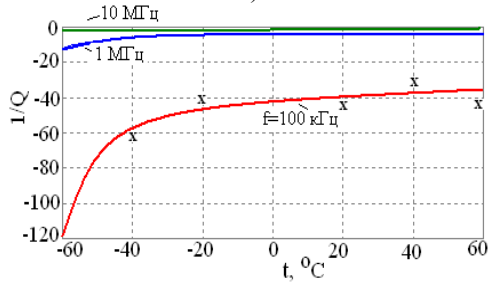
Аналіз формули (3) показує, що на частотах $\Omega\beta_o^2 < 1$, коли $\beta_o > 1$, що характерно для режиму мікроамперних струмів емітерного переходу, дійяна складова від'ємного опору $\text{Re } Z_{EB1}^{(-)} < 1$. Тому в цьому режимі досліджувану транзисторну індуктивність доцільно характеризувати від'ємною добротністю $Q_L^{(-)} = \text{Re } Z_{EB1}^{(-)} / \text{Im } Z_{EB1}$, вважаючи найбільш ефективним режимом її роботи, коли $Q^{(-)} < 1$.

На рис. 2 представленні розрахункові та експериментальні температурні та частотні залежності транзисторного еквівалента індуктивності на основі одноперехідного транзистора типу 2N2646, при $I_{ж} = 50$ мкА, $R_1 = 1$ кОм, $U_{ж} = 9$ В, $F = 0,1 - 10$ МГц, $t = -60 - 60$ °С.

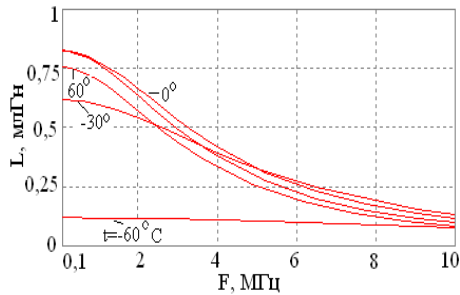
З ростом температури відбувається збільшення еквівалентної індуктивності і від'ємної добротності. В діапазоні температур $(-20 - +40$ °С) (рис. 2, а, б) температурний коефіцієнт індуктивності, де $Q^{(-)} < 1$, не перевищує $0,15\%$ град⁻¹. Для порівняння, температурний коефіцієнт індуктивності транзисторного еквівалента індуктивності на основі складового транзистора рівний $0,3\%$ град⁻¹ [2], а на основі лавинного транзистора $0,8\%$ град⁻¹.



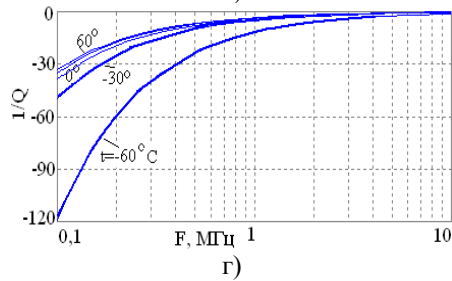
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Температурні (а, б) та частотні (в, г) залежності еквівалентної індуктивності і від'ємної добротності $1/Q$ транзисторного еквівалента індуктивності (x – експериментальні точки)

Аналіз частотних залежностей параметрів схеми при різних температурах (рис. 2, в, г), показав зменшення температурної залежності при зниженні робочої частоти, що пояснюється сильним впливом температури на граничну частоту транзистора f_{β} , а також на кут прольоту активної області бази θ , що веде до зменшення $R_{\delta 1}$ і $C_{\delta 1}$, які найбільш сильно впливають на L і $Q^{(-)}$.

Висновки. Аналіз температурної залежності еквівалентної індуктивності ОТС показав, що на низьких частотах вона визначається в основному впливом опору емітерного переходу і низькочастотним коефіцієнтом передачі транзистора по струму. На високих частотах ця залежність проявляється в зменшенні повного опору активної області бази.

В порівнянні з температурним коефіцієнтом індуктивності на основі лавинного або складового транзистора, транзисторний еквівалент індуктивності на основі одноперехідної транзисторної структури володіє більш чим в два рази більше температурною стабільністю.

Список літератури: 1 *Ионкин П.А.* Синтез RC-схем с активными взаимными элементами / *П.А. Ионкин, В.Г. Миронов.* – М.: Энергия, 1971. – 184 с. 2 *Осадчук В.С.* Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / *В.С. Осадчук* - К.: Вища шк. Головное издательство, 1987. – 155 с. 3 *Dill H.G.* Inductive semiconductor element and their application in handpass amplifiers / *H.G. Dill* // IRE Transactions on military electronics. – 1961. – V. MIL 5. – P. 239-250. 4 *Негоденко О.Н.* Анализ входного импеданса однопереходного транзистора / *О.Н. Негоденко, М.Ф. Пономарев* // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1971. – №12. – С. 1433-1437. 5 *Филинюк Н.А.* Полупроводниковые индуктивности для СВЧ диапазона / *Н.А. Филинюк, А.М. Кузёмко, Салех М.М. Журбан* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. - № 5. – С. 9-13. 6 *Ліщинська Л.Б.* Дослідження УПШ на базі ОТ від параметрів його фізичної еквівалентної схеми / *Л.Б. Ліщинська, М.В. Барабан, Я.С. Рожкова* // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – №6. – С. 1-6. 7 *Спиридонов Н.С.* Основы теории транзисторов / *Н.С. Спиридонов* – К.: Техника. – 1975. – 360 с.

Надійшла до редакції 04.03.2011