

ОСАДЧУК ОЛЕКСАНД

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0001-6662-9141](https://orcid.org/0000-0001-6662-9141)e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ДУМЕНКО ДЕНИС

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-4051-9355](https://orcid.org/0000-0002-4051-9355)e-mail: doomdenny@gmail.com

АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

У статті проаналізовано залежності параметрів транзисторних аналогів індуктивності (TAI) від температури. Розглянутий вплив температури на елементи першої групи. Розглянуто вплив температури на параметри електричної моделі транзистора. Визначено основні формули, які можна використати при практичних розрахунках задля визначення опору емітера в інтервалі температур застосування транзистора від -160 до 160 градусів за Цельсієм. Визначений залежність ємності емітерного переходу в інтервалі температури від -70 до 70 градусів за Цельсієм, наведені відповідні формули для її обчислення. Досліджено залежність опору бази транзистора від температури окремо для кремнієвих, та окремо для кремній-германієвих транзисторних структур, наведені відповідні вирази залежностей. Проаналізована залежність значення ємності колекторного переходу транзисторної структури від температури, визначені її залежності як для кремнієвих, так і для кремній-германієвих транзисторів. Виведена залежність, яка є справедливою при температурі від 0 до 80 градусів за Цельсієм. Досліджений коефіцієнт передачі струму, та його залежність від температури, наведені відповідні розрахунки, що доводять цю залежність, яка є справедливою при температурі від -70 до 70 градусів за Цельсієм. Також було досліджено залежність граничної частоти роботи транзистора від температури, виведені коригуючі коефіцієнти для дрейфових та бездрейфових транзисторів, наведені відповідні розрахунки та формули. Приведені графіки залежностей опору емітерного переходу та опору бази від температури. Для всіх досліджених параметрів транзисторної структури виведені основні температурні діапазони, що будуть справедливими при застосуванні в зазначених межах. Зроблені висновки про відповідні можливості застосування при рості чи зниженні температури, та необхідні дії для збереження ефективного використання транзисторних структур в таких умовах.

Ключові слова: параметри; температура; транзистор; індуктивність; частота; струм; емітер; колектор; база; добротність; навантаження; кремній; діапазон.

OSADCHUK OLEXANDER

Vinnitsia National Technical University

DUMENKO DENYS

Vinnitsia National Technical University

ANALYSIS OF THE DEPENDENCES OF THE PARAMETERS OF TRANSISTOR ANALOGUES OF INDUCTANCE ON TEMPERATURE

The article analyzes the dependence of parameters of transistor analogs of inductance (TAI) on temperature. The effect of temperature on the elements of the first group is considered. The effect of temperature on the parameters of the electrical model of the transistor is considered. The main formulas that can be used in practical calculations to determine the emitter resistance in the temperature range of transistor application from -160 to 160 degrees Celsius have been determined. The dependence of the capacitance of the emitter junction in the temperature range from -70 to 70 degrees Celsius is determined, and the corresponding formulas for its calculation are given. The dependence of the resistance of the transistor base on the temperature was studied separately for silicon and silicon-germanium transistor structures, and the corresponding expressions of the dependences were given. The temperature dependence of the value of the collector junction capacitance of the transistor structure was analyzed, and its dependences were determined for both silicon and silicon-germanium transistors. The dependence is derived, which is valid at a temperature from 0 to 80 degrees Celsius. The studied current transfer coefficient and its dependence on temperature, corresponding calculations are given, which prove this dependence, which is valid at a temperature from -70 to 70 degrees Celsius. The dependence of the limiting frequency of transistor operation on temperature was also investigated, the correcting coefficients for drift and driftless transistors were derived, the corresponding calculations and formulas were given. Graphs of dependences of emitter junction resistance and base resistance on temperature are given. For all investigated parameters of the transistor structure, the main temperature ranges are derived, which will be valid when applied within the specified limits. Conclusions have been made about the appropriate possibilities of application when the temperature increases or decreases, and the necessary actions to preserve the effective use of transistor structures in such conditions.

Keywords: parameters; temperature; transistor; inductance; frequency; current; emitter; collector; base; goodness; load; silicon; range

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення надійності, а також зменшення габаритів радіоелектронних приладів привело до створення нового науково-технічного напрямку в електроніці, яке отримало назву функціональної мікроелектроніки, основою якої є спеціалізовані інтегральні схеми [1–3]. Інтегральні схеми з успіхом виконують багато цифрових і лінійних функцій, які раніше виконувались за допомогою схем з дискретними радіокомпонентами. Однак, однією із функцій, яка не підлягає реалізації з використанням лише одних інтегральних схем, є підсилення із селекцією частоти. Причина полягає в неможливості мініатюризації

індуктивної компоненти з високою добротністю до розмірів, сумісних із іншими інтегральними компонентами. Якщо зменшувати всі розміри конденсатора, то ємність зменшується при цьому пропорційно, а добротність залишається незмінною при постійній частоті. Якщо таким же чином зменшувати елемент індуктивності, то добротність зменшується як квадрат кратності зменшення розмірів. Отже, потрібне суттєве підвищення характеристик магнітних матеріалів, перш ніж буде можливим розробити інтегральні LC-схеми селекції з високим значенням добротності.

Одним із методів вирішення даної проблеми є дослідження індуктивних властивостей і від'ємного диференційного опору у напівпровідникових приладах, а також схемотехнічних методів реалізації функції активної індуктивності [3]. Підвищення якості активних індуктивних елементів та пристроїв на їх основі можливо за рахунок використання від'ємного диференційного опору напівпровідникових приладів на основі транзисторних структур, бо характер реактивного і від'ємного диференційного опорів однозначно пов'язані між собою.

Із поширенням використання транзисторних структур, як найпоширенішою частиною електронного обладнання у всіх сферах нашого життя, гостро виникає проблема [1] залежності параметрів цих структур від температури задля застосування їх в певних умовах, або просто дослідження відповідних режимів їх роботи. Відповідно, виникає необхідність визначення точних та достовірних залежностей таких структур від температури, та їх чутливість до зовнішніх та внутрішніх чинників [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час постійно проводяться наукові дослідження, що аналізують проблематику та залежності параметрів транзисторних структур та можливості зменшення їх впливу на роботу транзистора й всього приладу в цілому [4–8]. Найбільш ґрунтовними дослідженнями серед опублікованих є роботи таких авторів як Florian Rigaud-Minet, Julien Buckley, Eva Bestelink, Hao-Jing Teng, Alessandro Grillo, Enver Faella. Всі вони описують питання, що безпосередньо пов'язані з залежностями певних транзисторних структур від температури та індивідуальних особливостей та аспектів в напівпровідниках [4].

А оскільки тенденція використання транзисторних структур тільки зростає, то ми потребуємо і подальших досліджень цієї проблематики.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері проблема все ще є актуальною і потребує подальшого дослідження та виявлення нових методів усунення впливу температури на параметри роботи транзистора чи покращення існуючих. Оскільки кожне застосування тієї чи іншої транзисторної структури є унікальним, то проблема потребує подальших досліджень й виявлення найкращих шляхів реалізації впровадження таких структур.

Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз залежностей параметрів транзисторних аналогів індуктивності від температури, її впливу на транзисторні структури, та способів нівелювання цього впливу. Аналіз максимальних температур роботи таких структур, при яких зберігається можливість їх ефективного застосування.

Виклад основного матеріалу

Температура, є одним з основних чинників, які ускладнюють проектування та розробку будь-яких радіотехнічних та телекомунікаційних систем. Прямо чи опосередковано вона впливає на роботу пристрою, і після досягання певної межі, пристрій вже виходить за ефективний режим роботи, після чого його використання може бути не доцільним [5]. Це залежить від низки факторів, один з яких є чутливість радіотехнічних компонентів до зміни температури. Деякі з них можуть витримувати відхилення в сотні градусів, а деякі вже суттєво погіршують свої параметри від зміни кількох градусів за шкалою Цельсія. Розглянемо вплив температури на транзисторні аналоги індуктивності, як одні з базисних компонентів при проектуванні високочастотних систем передачі інформації.

1. Опір емітерного переходу.

Опір емітерного переходу може впливати на роботу транзистора, величину струму бази та коефіцієнт підсилення. Як правило, опір емітерного переходу зменшується з підвищенням температури. Через підвищення температури збільшується кількість електронів та дірок, що генеруються на базі транзистора, що сприяє зменшенню опору. Також, через збільшення температури зменшується ширина забороненої зони емітерного переходу, що збільшує ймовірність тунелювання через перехід.

При практичних розрахунках в інтервалі температур $\pm 160^\circ\text{C}$ можна використати наступну формулу для визначення опору емітера

$$Z_{Et} = Z_{E20^\circ\text{C}} \cdot (0,4 + C_3 \Delta t_3), \quad (1)$$

де $C_3 = 5 \cdot 10^{-3}$, $\Delta t_3 = t + 100^\circ\text{C}$.

Важливо звернути увагу, що опір емітерного переходу не є лінійним та варіюється від обраного транзистора, його матеріалу та конструкції збірки.

2. Ємність емітерного переходу.

Ємність емітерного переходу так само впливає на вхідні та вихідні характеристики роботи транзисторного каскаду. Велике значення ємності знижує частотну характеристику транзистора, відповідно обмежує швидкодію [6]. Основними чинниками що впливають на її значення є ширина забороненої зони та концентрація носіїв заряду.

Залежність ємності емітерного переходу в інтервалі температури $\pm 70^\circ \text{C}$ можливо представити наступним наближеним виразом

$$C_E = C_{E20^\circ\text{C}} = \frac{0,72 + C_4 \Delta t_4}{1 + C_2 \Delta t_2}, \quad (2)$$

де $C_4 = 3,1 \cdot 10^{-3}$, $C_2 = 5,8 \cdot 10^{-3}$, $\Delta t_4 = t + 70^\circ\text{C}$

Зазвичай, при збільшенні температури, рух носіїв заряду у напівпровіднику прискорюється, що призводить до зменшення часу заряду та, як наслідок, - зменшення ємності переходу [9].

Зобразимо графічно цю залежність на рисунку 1.

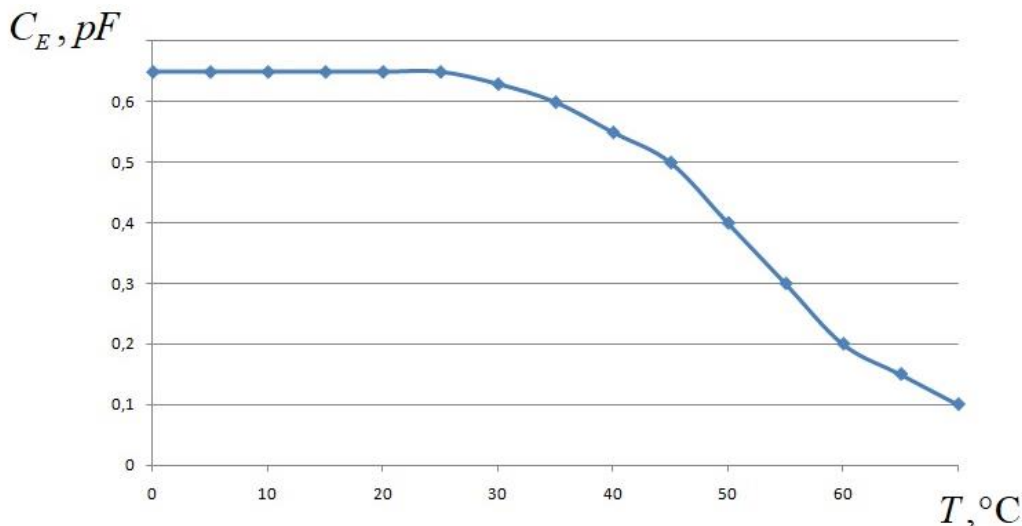


Рис. 1. Графік залежності ємності емітерної ємності від температури

Ємність емітерного переходу також є унікальною для окремо обраного транзистора.

3. Опір бази. Опір бази транзистора пов'язаний з процесами рекомбінації електронів та дірок у переході, а також з опором між шарами напівпровідникової структури [10]. Залежність опору бази від температури можливо представити наступним наближеним виразом

$$Z_{Bt} = Z_{B20^\circ\text{C}} \cdot (1 + C_2 \Delta t), \quad (3)$$

В діапазоні температур від -80°C до 20°C $C_2 = 5,8 \cdot 10^{-3}$, $\Delta t = t + 20^\circ\text{C}$ при $t > 20^\circ\text{C}$ $C_2 = 0$.

Для кремнієвих транзисторів цей вираз справедливий в інтервалі температур від -60 до 100°C .

Опір бази кожного окремого транзистора також є унікальною величиною.

4. Ємність колекторного переходу. Як правило, ємність колекторного переходу зменшується зі збільшенням температури. Це пов'язано з концентрацією носіїв заряду, їх рухливістю та шириною забороненої зони напівпровідника.

Для практичних розрахунків в інтервалі температур можемо скористатися наступною формулою

$$C_K = C_{K20^\circ\text{C}} = \exp(C_5 d), \quad (4)$$

де $d = \frac{\Delta t_5}{T_0 (-T_0 + \Delta t_5)}$, $T_0 = 293^\circ\text{K}$

$\Delta t_5 = t - 20^\circ\text{C}$, C_5 – температурний коефіцієнт матеріалу.

Для германієвих транзисторів $C_5 = 2,08 \cdot 10^{-3}$.

Для кремнієвих - $C_5 = 3,25 \cdot 10^{-3}$.

Формула справедлива для інтервалу температур $0 + 80^\circ\text{C}$. Для низьких температур $C_{Kt} \approx C_{K20^\circ\text{C}}$.

Ємність колекторного переходу, при своєму великому значенні, затрачає велику частину енергії на її заряджання та розряджання, а от при нагріванні ефективність споживання енергії навпаки покращується [11].

5. Коефіцієнт передачі струму. Так як більшість приладів дозволяє виміряти коефіцієнт передачі струму бази, то ми будемо розглядати залежність $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ від температури. Цю залежність можна представити наступним чином

$$\beta_t = \beta_{20^\circ\text{C}} = (0,72 + C_H \Delta t_H), \quad (5)$$

де $C_H = 3,1 \cdot 10^{-3}$, $\Delta t_H = t + 70^\circ\text{C}$.

Цей вираз справедливий для реальних транзисторів в діапазоні температур $\pm 70^\circ\text{C}$.

6. Гранична частота. Вираз для граничної частоти транзистора може бути представлено в вигляді

$$f_t = \frac{2,43 \cdot D_p}{2\pi m \omega^2}, \quad (6)$$

де $m = 1,2$ – для дрейфових транзисторів; $m = 1,6$ – для бездрейфових транзисторів.

Залежність параметрів транзисторної індуктивності від частоти, режиму живлення й інших факторів визначається залежністю дійсної та уявної частин повного вхідного опору від цих факторів. Визначимо повний вхідний опір транзисторного аналога індуктивності:

$$Z_{ex} = \frac{C + j\omega \cdot T_o D}{g_{11}(1 + j\omega \cdot T_o A - (\omega \cdot T_o)^2 B)}. \quad (7)$$

Проведемо поділ виразу (7) на дійсну і уявну частини. Це необхідно зробити, тому що уявна частина визначає величину індуктивності, а відношення уявної частини до дійсної - величину добротності, отже:

$$R_e(Z_{ex}) = R = \frac{C(1 - (\omega \cdot T_o)^2 B) + (\omega \cdot T_o)^2 DA}{g_{11}((1 - (\omega \cdot T_o)^2 B)^2 + (\omega \cdot T_o A)^2)}. \quad (8)$$

$$I_m(Z_{ex}) = X = \frac{\omega \cdot T_o (D(1 - (\omega \cdot T_o)^2 B) - AC)}{g_{11}((1 - (\omega \cdot T_o)^2 B)^2 + (\omega \cdot T_o A)^2)}. \quad (9)$$

Для більш наочного представлення розглянутих залежностей перепишемо вирази (8) і (9) з урахуванням параметрів транзисторів. Поправочні коефіцієнти мають значення $m = 0,21$ і $T = 1,04 / \omega_\alpha$.

Провідність g_{11} дорівнює зворотній величині опору емітера.

Таким чином:

$$R = \frac{(r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 - \frac{\omega^2 r_o C_{ПК} 1,04}{\omega_\alpha} \right) + \left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 1,19 \cdot r_o \left(1 + \frac{r_o \omega_\alpha C_{ПК}}{1,04} \right)}{\left(1 - \frac{1,04\omega^2 r_o C_{ПК}}{\omega_\alpha} \right)^2 + \left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 \left(1 + \frac{r_o C_{ПК} \omega_\alpha}{1,04} \right)^2}, \quad (10)$$

$$X = \frac{\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \left(1,19 \cdot r_o \left(1 - \frac{\omega^2 r_o C_{ПК} 1,04}{\omega_\alpha} \right) - (r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 + \frac{r_o \omega_\alpha C_{ПК}}{1,04} \right) \right)}{\left(1 - \frac{1,04\omega^2 r_o C_{ПК}}{\omega_\alpha} \right)^2 + \left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 \left(1 + \frac{r_o C_{ПК} \omega_\alpha}{1,04} \right)^2}. \quad (11)$$

На основі виразів (10) та (11) запишемо значення індуктивності і добротності транзисторного аналога індуктивності:

$$L = \frac{\frac{1,04}{\omega_\alpha} \left(1,19 \cdot r_o \left(1 - \frac{\omega^2 r_o C_{ПК} 1,04}{\omega_\alpha} \right) - (r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 + \frac{r_o \omega_\alpha C_{ПК}}{1,04} \right) \right)}{\left(1 - \frac{1,04\omega^2 r_o C_{ПК}}{\omega_\alpha} \right)^2 + \left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 \left(1 + \frac{r_o C_{ПК} \omega_\alpha}{1,04} \right)^2}, \quad (12)$$

$$Q = \frac{\frac{1,04}{\omega_\alpha} \left(1,19 \cdot r_o \left(1 - \frac{\omega^2 r_o C_{ПК} 1,04}{\omega_\alpha} \right) - (r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 + \frac{r_o \omega_\alpha C_{ПК}}{1,04} \right) \right)}{(r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 - \frac{1,04\omega^2 r_o C_{ПК}}{\omega_\alpha} \right) + \left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 \cdot 1,19 r_o \cdot \left(1 + \frac{r_o C_{ПК} \omega_\alpha}{1,04} \right)}. \quad (13)$$

Аналіз виразу (10) показує, що при частотах $\omega \ll \omega_\alpha$ збільшення активної складової пов'язане зі зростанням складової $\left(\frac{1,04\omega}{\omega_\alpha} \right)^2 \cdot 1,19 r_o \cdot \left(1 + \frac{r_o C_{ПК} \omega_\alpha}{1,04} \right)$. При значенні частот, що наближаються до граничної

ω_α і вище, починає виявлятися вплив $(r_e + r_o(1 - \alpha_o)) \left(1 - \frac{1,04\omega^2 r_o C_{ПК}}{\omega_\alpha} \right)$ складової, що прагне зменшити величину активної складової, що в сумі приводить до того, що вона залишається незмінною. На частотах більших

граничної частоти, обумовленою ланцюгом колектора, може спостерігатися навіть зменшення величини R .

Реактивна складова має складну залежність від частоти. В області частот нижче ω_α відбувається її збільшення, яке викликане зростанням множника ω / ω_α . У діапазоні частот, коли час проходження носіїв струму через базову область транзистора дорівнює періоду прикладених коливань, реактивна складова повного опору досягає максимального значення і подальше збільшення частоти приводить до її зменшення і потім перехід з індуктивного в ємнісний характер. На основі виразу (11) визначаємо значення частоти при якій змінюється характер повного вхідного опору

$$\omega_{x=0} = \sqrt{\frac{\omega_\alpha \omega_\kappa}{1,24 r_o} \left(1,19 r_o - (r_e + r_o (1 - \alpha_o)) \left(1 + \frac{\omega_\alpha}{1,04 \omega_\kappa} \right) \right)}, \quad (14)$$

де

$$\omega_\kappa = \frac{1}{r_o C_{ПК}}$$

Як видно з (14), значення $\omega_{x=0}$ істотно залежить від режиму живлення транзистора по постійному струму і це створює передумови для керування характером повного опору в пристроях радіоелектроніки.

Зміна температури навколишнього середовища позначається на значеннях параметрів, що входять у вираз L і Q . Це приводить до небажаних явищ при практичному використанні транзисторних індуктивностей. Зарядна ємність колектора зменшується в невеликому ступені зі збільшенням температури, тому що контактна різниця потенціалів переходу колектор-база, по своїй величині значно менше колекторної постійної напруги і зростає пропорційно температурі.

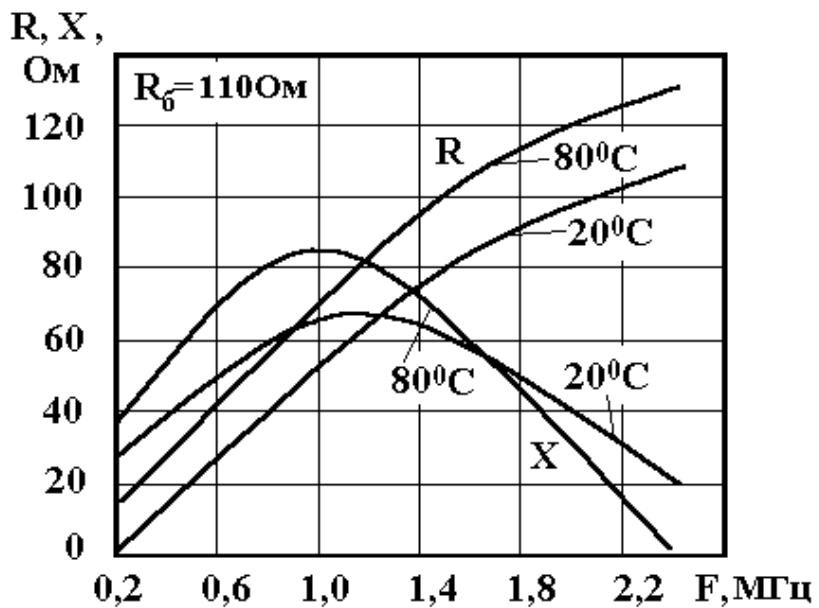


Рис. 2. Залежність активної і реактивної складових від частоти при різних значеннях температури

На рис. 2 надана температурна залежність активної і реактивної складових вхідного опору транзисторного аналога індуктивності. Як видно з графіка, реактивна частина в області низьких частот (200 КГц) при збільшенні температури на 60°C збільшилася на 10 Ом при зовнішньому опорі бази рівним 110 Ом, а в області високих частот (1 МГц) зміна реактивного опору була 20 Ом, що складає 32,4 %. Активна частина при тій же зміні температури на частоті 200 КГц збільшилася на 87%. Також з графіка видно, що гранична частота при зміні температури на 60°C змінилася на 16,7% в сторону зменшення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що основні параметри транзисторних структур, які потрібно враховувати при розробці радіотехнічних та телекомунікаційних систем, сильно залежать від температури та від конструкції, використаних матеріалів та технології виготовлення конкретного транзистора. А також варто підкреслити, що вплив температури не завжди спричиняє негативні наслідки, іноді зміни тих чи інших параметрів можуть позитивно вплинути на певні параметри роботи транзисторного каскаду або пристрою в цілому.

Розглянуто вплив температури на параметри електричної моделі транзистора. Визначено основні формули, які можна використати при практичних розрахунках задля визначення опору емітера в інтервалі температур застосування транзистора від -160 до 160 градусів за Цельсієм. Визначений залежність ємності емітерного переходу в інтервалі температури від -70 до 70 градусів за Цельсієм, наведені відповідні формули для її обрахунку. Досліджено залежність опору бази транзистора від температури окремо для кремнієвих, та окремо для германієвих транзисторних структур, наведені відповідні вирази залежностей. Проаналізована залежність значення ємності колекторного переходу транзисторної структури від температури, визначені її залежності як для кремнієвих, так і для германієвих транзисторів. Виведена залежність, яка є справедливою при температурі від 0 до 80 градусів за Цельсієм. Досліджений коефіцієнт передачі струму, та його залежність від температури, наведені відповідні розрахунки, що доводять цю залежність, яка є справедливою при температурі від -70 до 70 градусів за Цельсієм. Також було досліджено

залежність граничної частоти роботи транзистора від температури, виведені коригуючі коефіцієнти для дрейфових та бездрейфових транзисторів, наведені відповідні розрахунки та формули.

Література

1. Grillo A., Enver Faella, Filippo Giubileo, Aniello Pelella, Francesca Urban. Temperature Dependence of Germanium Arsenide Field-Effect Transistors Electrical Properties. 2nd International Online-Conference on Nanomaterials, Salerno, Italy, 2020, pp. 1-7.
2. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 183 с.
3. Bestelink Eva, Hao-Jing Teng, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, and Radu A. Sporea. Extraordinarily Weak Temperature Dependence of the Drain Current in Small-Molecule Schottky-Contact-Controlled Transistors through Active-Layer and Contact Interplay. *Advanced Electronic Materials* Volume 9, Issue 3. 2022. P 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.202201163>
4. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 336 с.
5. Rigaud-Minet Florian, Julien Buckley, William Vandendaele, Matthew Charles, Marie-Anne Jaud Capacitance Temperature Dependence Analysis of GaN-on-Si Power Transistors. *Energies journal*, Volume 9, Issue 3. September 2022. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197062>
6. O. Faruqe M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
7. Razavi B. The Active Inductor. A Circuit for All Seasons. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 7-11, Spring 2020, doi: 10.1109/MSSC.2020.2987500.
8. AlShaikh Ali H.A.A., Murad S.A.Z., Hasan A.F., Bakar F.A., Sapawi R. Design of High-Quality Factor Active Inductor Using CMOS 0.18- μ m Technology for 5G Applications. 2022 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), pp.1-4, 2022.
9. Осадчук О. В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 256–259.
10. Guacci M., Heller M., Neumayr D., Bortis D., Kolar J.W. On the Origin of the COSS-Losses in Soft-Switching GaN-on-Si Power HEMTs. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* 2019, v. 7, pp. 679–694. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2885442>.
11. Diao S., Wang Y., Wang C., Lin F., Heng C. H. VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.

References

1. Grillo A., Enver Faella, Filippo Giubileo, Aniello Pelella, Francesca Urban. Temperature Dependence of Germanium Arsenide Field-Effect Transistors Electrical Properties. 2nd International Online-Conference on Nanomaterials, Salerno, Italy, 2020, pp. 1-7.
2. V. S. Osadchuk Generators of electric oscillations based on transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 183 p.
3. Bestelink Eva, Hao-Jing Teng, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, and Radu A. Sporea. Extraordinarily Weak Temperature Dependence of the Drain Current in Small-Molecule Schottky-Contact-Controlled Transistors through Active-Layer and Contact Interplay. *Advanced Electronic Materials* Volume 9, Issue 3. 2022. P 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.202201163>
4. Functional nodes of radio measuring devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov, et al. — Vinnytsia: VNTU, 2011. — 336 p.
5. Rigaud-Minet Florian, Julien Buckley, William Vandendaele, Matthew Charles, Marie-Anne Jaud Capacitance Temperature Dependence Analysis of GaN-on-Si Power Transistors. *Energies journal*, Volume 9, Issue 3. September 2022. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197062>
6. O. Faruqe M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
7. Razavi B. The Active Inductor. A Circuit for All Seasons. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 7-11, Spring 2020, doi: 10.1109/MSSC.2020.2987500.
8. AlShaikh Ali H.A.A., Murad S.A.Z., Hasan A.F., Bakar F.A., Sapawi R. Design of High-Quality Factor Active Inductor Using CMOS 0.18- μ m Technology for 5G Applications. 2022 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), pp.1-4, 2022.
9. O. V. Osadchuk Mathematical modeling of a microwave generator based on a transistor structure with negative resistance / O. V. Osadchuk, A. O. Semenov // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. – 2005. – No. 4, Part 1, Volume 2. – P. 256–259.
10. Guacci M., Heller M., Neumayr D., Bortis D., Kolar J.W. On the Origin of the COSS-Losses in Soft-Switching GaN-on-Si Power HEMTs. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* 2019, v. 7, pp. 679–694. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2885442>.
11. Diao S., Wang Y., Wang C., Lin F., Heng C. H. VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.