

ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ КВАНТОВОЇ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Розгляд фізичних процесів у квантовій двобар'єрній гетероструктурі, яка є основою розбудови тунельно-резонансних діодів показав, що тунельно-резонансні діоди можна використовувати як сенсори температури з частотним вихідним сигналом. Використання приладів з від'ємним диференціальним опором дозволяють значно спростити конструкцію сенсорів температури в усьому діапазоні радіочастот, при якому в залежності від режимів роботи сенсора можна отримати вихідний сигнал як у формі гармонічних коливань, так і у формі імпульсних коливань спеціальної форми.

Дослідження характеристик сенсора базується на еквівалентній схемі тунельно-резонансного діода, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Вольт-амперна характеристика сенсора має спадну ділянку, що відповідає виникненню від'ємного диференціального опору на цій ділянці. Спадна ділянка виникає внаслідок зменшення струму, який проходить скрізь двобар'єрну квантову гетероструктуру, із збільшенням напруги. Спад струму відбувається за рахунок зменшення коефіцієнта прозорості потенціальних бар'єрів гетероструктури.

Розроблено математичну модель сенсора температури, на основі якої визначено аналітичні залежності зміни елементів еквівалентної схеми сенсора від температури, а також функції перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок в зміни функції перетворення і чутливості сенсора вносить зміна від'ємного диференціального опору із зміною температури. Це, у свою чергу, приводить до різних показників вихідної частоти приладу. Чутливість сенсора змінювалась від 480 кГц/°C до 220 кГц/°C в діапазоні температур від -150 °C до 50 °C.

Ключові слова: квантова двобар'єрна гетероструктура, тунельно-резонансний діод, від'ємний диференціальний опір, частота.

A.V. OSADCHUK, V.S. OSADCHUK, I.O. OSADCHUK
Vinnytsia National Technical University

STUDY OF A FREQUENCY OUTPUT TEMPERATURE SENSOR BASED ON A QUANTUM HETEROSTRUCTURE WITH A NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

Physical processes in a quantum two-barrier heterostructure, which is the basis for the development of tunnel-resonant diodes, are considered. These studies have shown that tunnel resonance diodes can be used as temperature sensors with a frequency output signal. The use of devices with negative differential resistance makes it possible to significantly simplify the design of temperature sensors in the entire radio frequency range, at which, depending on the operating modes of the sensor, an output signal can be obtained both in the form of harmonic oscillations and in the form of impulse oscillations of a special form.

The study of the characteristics of the sensor is based on the equivalent circuit of the tunnel-resonant diode, which takes into account its capacitive and inductive properties. The current-voltage characteristic of the sensor has a falling section, which is responsible for the appearance of a negative differential resistance in this section. The descending section arises due to a decrease in the current that flows through the double-barrier quantum heterostructure, with an increase in voltage. A decrease in the current occurs due to a decrease in the transparency coefficient of the potential barriers of the heterostructure.

A mathematical model of the temperature sensor has been developed, on the basis of which the analytical dependences of the change in the elements of the equivalent circuit of the sensor on temperature, as well as the transformation function and sensitivity, have been determined. It is shown that the main contribution to changes in the conversion function and sensor sensitivity is made by the change in the negative differential resistance with a change in temperature. This, in turn, results in different readings of the instrument's output frequency. The sensor sensitivity was varied from 480 kHz/°C to 220 kHz/°C in the temperature range from -150 °C to 50 °C.

Keywords: quantum double-barrier heterostructure, tunnel-resonant diode, negative differential resistance, frequency.

Постановка проблеми

Використання досягнень сучасних технологій привело до значних успіхів у створенні різноманітних приладів контролю і керування виробничих процесів в усіх галузях промисловості [1, 4–8]. Проте отримання високих метрологічних характеристик апаратури контролю і керування досягається за рахунок підвищення її складності, габаритів, маси і вартості. Для подальшого суттєвого підвищення якості такої апаратури необхідно використовувати нові фізичні явища і пошук нових принципів реалізації пристроїв і сенсорів фізичних величин, які визначаються багатофункціональністю, малою споживаною потужністю, стабільністю характеристик, високою чутливістю, підвищеною швидкодією і надійністю [1–8].

Сенсори температури є одним із ключових класів сенсорів фізичних величин, які знайшли застосування в усіх технологічних процесах виробництва. Їх характеристики і параметри визначають якість виробництва продукції. Вказані вище переваги сенсорів температури можна отримати при використанні досягнень сучасної нанотехнології, що дозволяє створювати квантові гетероструктури. Використання квантових гетероструктур в якості сенсорів температури на основі тунельно-резонансних діодів дозволяє отримати від'ємний диференціальний опір та надвисокочастотні властивості цих приладів. Ці властивості тунельно-резонансних діодів дозволяють розбудову нового класу сенсорів температури, які працюють в режимі перетворення «температура-частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективним науковим напрямком у створенні сенсорів температури є дослідження в області сенсорів на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором. Сенсори температури з частотним виходом поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують сенсори з кодовим виходом. Подальше перетворення частотно-модульованого сигналу зводиться в основному до підрахунку періодів сигналу у продовж певного часу-операції, що за простотою і точністю перевищує всі інші методи аналого-цифрового перетворення. Слід підкреслити, що реактивні властивості та від'ємний диференціальний опір однозначно зв'язані між собою, а простота та багатофункціональність мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором є перспективним напрямком при їх створенні та практичному використанні. Застосування принципу перетворення «температура-частота» на основі наноелектронних квантових гетероструктур з від'ємним диференціальним опором суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні характеристики сенсорів температури, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу, тобто температуру у частоту [10–17].

Постановка завдання

Метою роботи є створення та дослідження сенсора температури на основі тунельно-резонансного діода, який одночасно виступає як первинний сенсор температури, так і прилад з від'ємним диференціальним опором, на основі якого базується генератор сенсора. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати переваги застосування квантових гетероструктур з від'ємним диференціальним опором;
- 2) розрахувати основні характеристики сенсора температури, в яких враховано залежність властивостей тунельно-резонансного діода від температури;
- 3) зробити висновки з проведених досліджень.

Математична модель сенсора температури

Сенсор температури з частотним вихідним сигналом будуватиметься на основі квантової гетероструктури, що лежить в основі роботи тунельно-резонансного діода. Тому необхідно розглянути фізичний принцип роботи діода, залежність його параметрів від температури, розбудову генератора на його основі. Залежність вихідної частоти генератора від температури, а також визначити чутливість та її залежність від температури.

Тунельно-резонансний ефект, який лежить в основі роботи тунельно-резонансних діодів, виник на основі досягнень гетероепітаксальної технології, за допомогою якої створено квантово-розмірні структури. В таких структурах використовують хвильову природу носіїв заряду, тобто явище резонансного тунелювання електронів через послідовно розташовані напівпрозорі потенціальні бар'єри, розділені квантовими ямами. Це аналогічно резонансному проходженню фотонів через систему у напівпрозорих дзеркал, які утворюють інтерферометр Фабрі-Перо [18]. Основною структурою з резонансного тунелювання електронів є типова квантова гетероструктура AlAs-GaAs-AlAs. Омичні контакти до такої структури формуються з використанням сильно легованих n^+ - шарів напівпровідника GaAs, який має вузьку енергетичну зону в порівнянні з бар'єроутворюючими напівпровідниками AlAs. Потенціальні бар'єри і квантова яма між ними утворені за рахунок різних значень ширини заборонених зон для напівпровідникових сполук GaAs і AlAs, що приводить до розриву енергетичних рівнів дна зони провідності і стелі валентної зони. Прикладання зовнішньої напруги до електродів емітер-колектор квантової гетероструктури приводить до зміни кількості електронів, які тунелюють через потенціальні бар'єри і квантову яму, що приводить до зміни величини струму через структуру. При цьому резонансне тунелювання електронів приводить до різкої немонотонної залежності коефіцієнта прозорості від енергії електронів, причому енергетична ширина резонансної лінії залежить від параметрів квантово-розмірної структури. Це викликає появу спадної ділянки на вольт-амперній характеристиці тунельно-резонансного діода, що відповідає виникненню від'ємного диференціального опору у діоді. У випадку, коли енергія електронів починає перевищувати потенціальну енергію бар'єрів, струм різко зростає за експоненціальним законом від прикладеної зовнішньої напруги до діода. Цей якісний опис був експериментально підтверджений дослідженнями Л. Есакі [19] як для діодів, так і наддроток з квантових гетероструктур.

Для отримання вольт-амперної характеристики тунельно-резонансного діода використовується рівняння Шредінгера у загальному вигляді [20]

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \vec{r}^2} + U(\vec{r})\psi_n(\vec{r}) = E(\vec{K})\psi_n(\vec{r}) - E_n(0)\psi_n(\vec{r}), \quad (1)$$

де $\psi_n(\vec{r})$ – хвильова функція електрона, яка залежить від радіуса-вектора \vec{r} , що відповідає електрону з енергією рівня n ; $U(\vec{r})$ – потенціальна енергія бар'єрів; \vec{K} – хвильовий вектор електрона; $E(\vec{K})$ – енергія електрона; $E_n(0)$ – енергія при $K=0$. На основі рівняння (1) отримана функція щільності струму від прикладеної напруги, яка має назву функції Тцу-Есакі [21]

$$j = \frac{qm^*kT}{2\pi^2\hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} T(E_z) \log \left[\frac{1 + \exp\left(\frac{E_f - E_z}{kT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{E_f - E_z - qU}{kT}\right)} \right] dE_z, \quad (2)$$

де q – заряд електрона, m^* – ефективна маса електрона, \hbar – відносна стала Планка, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, E_f – рівень Фермі у зоні провідності емітера, E_c – рівень дна зони провідності емітера, E_z – енергія електрона у напрямку координати z , U – прикладена напруга, $T(E_z)$ – коефіцієнт прозорості проходження електронами потенціальних бар'єрів і квантової ями. Для більш точного опису вольт-амперної характеристики необхідно враховувати фононне розсіювання електронів, розсіювання на домішках, розсіювання на границях, розсіювання електронів на сплавах. Найбільш точно описує вольт-амперну характеристику тунельно-резонансних діодів чисельна кінетична модель на базі функцій Гріна [20]. Однією з проблем в розрахунках вольт-амперної характеристики є визначення коефіцієнта прозорості $T(E_z)$ двобар'єрної квантової гетероструктури. Під коефіцієнтом прозорості потенціального бар'єру розуміють відношення щільності потоку електронів, які пройшли через бар'єр, до щільності потоку електронів падаючої хвилі, а коефіцієнт відбиття електронів від бар'єру визначається відношенням щільності потоку відбитих електронів від бар'єру до щільності потоку падаючих на бар'єр електронів. У нашому випадку двобар'єрної квантової гетероструктури коефіцієнт прозорості $T(E)$ набуває більш складного вигляду і являє собою добуток двох величин: T_E – для першого бар'єру або емітера і T_K – для другого бар'єру колектора, отже $T(E) = T_E \cdot T_K$. При цьому розглядається ситуація, коли енергія електронів E менше висоти бар'єрів U_0 . Коефіцієнт прозорості такої двобар'єрної структури описується рівнянням [22]

$$T(E) = \frac{T_o^2}{T_o^2 + 4R_o \cos^2(\xi a - \theta)}, \quad (3)$$

де величини T_o і R_o коефіцієнти прозорості і відбивання для одиночного бар'єра, $\xi = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m^*(U_o - E)}$, a – товщина бар'єру, θ – фазовий кут.

Перейдемо до розгляду роботи сенсора температури, електрична схема якого подана на рис. 1.

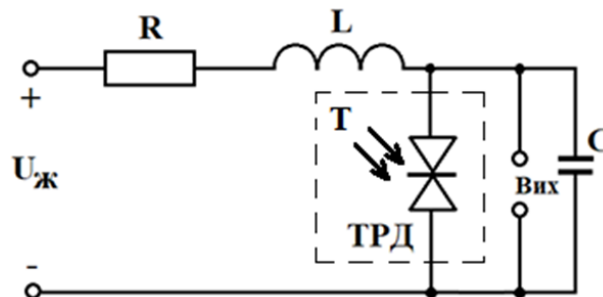
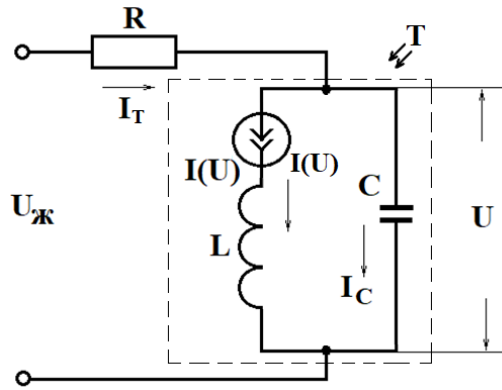


Рис. 1. Електрична схема сенсора температури на основі тунельно-резонансного діода

Електрична схема сенсора температури живиться від джерела постійної напруги $U_{ж}$, опору втрат R , який включає всі омичні опори схеми, зовнішньої індуктивності L , яка послідовно підключена до внутрішньої індуктивності діода, а також містить в собі індуктивності виводів схеми, зовнішньої ємності C , яка паралельно підключена до внутрішньої ємності діода, а також сам тунельно-резонансний діод, на який діє температура. Слід підкреслити, що в схемі сенсора температури з частотним виходом тунельно-резонансний діод виступає як первинний сенсор температури, так і як генератор надвисокочастотних коливань з коливальною LC системою.

Спочатку розглянемо роботу генератора, визначимо умови його стабільної роботи, режими виникнення синусоїдальних коливань, залежність вихідної частоти від часу. Ці умови його роботи можливо визначити на основі еквівалентної схеми, яка подана на рис. 2.

Рис. 2. Еквівалентна схема сенсора температури з внутрішнім джерелом струму $I(U)$

Еквівалентна схема сенсора температури для розрахунку його характеристик подано на рис. 3. Джерело струму $I(U)$ у робочій точці сенсора на спадній ділянці вольт-амперної характеристики визначає відношення $U/I(U)$, що відповідає від'ємному диференційному опору $-R_g$, тому у подальшому в еквівалентній схемі (рис. 3) замінюється на R_g .

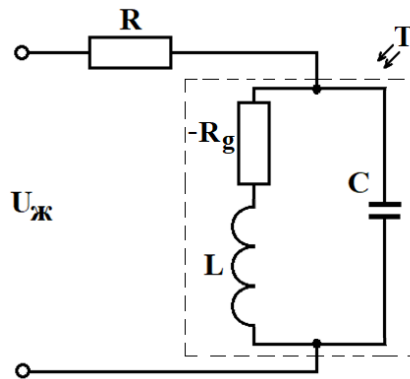


Рис. 3. Еквівалентна схема сенсора температури

У відповідності з рис. 2, складені рівняння Кірхгофа, які потрібні для аналізу схеми автогенератора сенсора температури

$$U_{\text{ж}} = RI_T - R_g I(U) + L \frac{dI(U)}{dt}, \quad (4)$$

$$I_T = I_C + I(U) = C \frac{dU}{dt} + I(U), \quad (5)$$

З рівнянь (4) і (5) визначимо складові, які визначають розвиток процесів у схемі

$$\frac{dI(U)}{dt} = \frac{U_{\text{ж}} - RI_T + R_g I(U)}{L}, \quad (6)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_T - I(U)}{C}. \quad (7)$$

У стані рівноваги схеми ($U = U_0$, $I_T = I_{T_0}$) струми і напруги залишаються незмінними

$$\left. \frac{dI(U)}{dt} \right|_{I_T=I_{T_0}} = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \quad (9)$$

З рівнянь (8) і (9) визначаємо струми і напруги у стані рівноваги

$$U_0 = RI_{T_0} - R_g I(U_0), \quad (10)$$

$$I_{T_0} = I(U_0). \quad (11)$$

Стан рівноваги схеми автогенератора електричних коливань реалізується в одній точці перетину спадної ділянки вольт-амперної характеристики діода і лінії статичного навантаження.

Визначення стійкості стану рівноваги визначається аналітичним методом А.М. Ляпунова [23]. У відповідності з цим методом правильна відповідь на питання стійкості стану рівноваги нелінійної системи (4) і (5) дає дослідження рівнянь її першого наближення (лінійного). Для отримання цих рівнянь введемо

нові змінні для системи (4) і (5)

$$u = U - U_0, \quad (12)$$

$$i = I_T - I_{T_0}, \quad (13)$$

якої описують невеликі відхилення стану схеми сенсора від параметрів рівноваги U_0, I_{T_0} . Нелінійну статичну характеристику тунельно-резонансного діода поблизу стану рівноваги замінимо лінійною функцією $I(U_0 + u) = I(U_0) + u/R_g$, яка включає від'ємний диференціальний опір R_g у точці рівноваги. Нелінійні ємність $C(U)$ і індуктивність $L(U)$ будемо вважати постійними. Тоді рівняння (6) і (7) приймуть вигляд

$$\frac{di}{dt} = \frac{-Ri + u}{L}, \quad (14)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i - u/R_g}{C}. \quad (15)$$

Виконаємо диференціювання рівняння (15) і підставимо в нього рівняння (14), отримаємо

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{1}{C} \left[\frac{-Ri + u}{L} - \frac{1}{R_g} \cdot \frac{du}{dt} \right]. \quad (16)$$

У рівняння (16) підставимо замість струму його вираз

$$i = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_g}, \quad (17)$$

тоді кінцевий вигляд рівняння (16) описується формулою

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) \frac{du}{dt} + \frac{u}{LC} \left(1 + \frac{R}{R_g} \right) = 0. \quad (18)$$

У відповідності з рівнянням (18) складемо характеристичне рівняння системи

$$x^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) x + \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{R}{R_g} \right) = 0. \quad (19)$$

Розв'язок рівняння (19) визначається виразами

$$x_{1,2} = \frac{-\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right)^2 - \frac{4}{LC} \left(\frac{R}{R_g} + 1 \right)}}{2}. \quad (20)$$

Стійкість стану рівноваги за Ляпуновим визначається властивостями коренів рівняння (19). Якщо дійсні складові коренів позитивні, то стан рівноваги є стійким, а для виникнення коливань в системі необхідно, щоб корені мали комплексні значення. Виходячи з цих вимог можна записати умови стійкої роботи автогенератора сенсора температури

$$\left| \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) \right| < 0, \quad (21)$$

$$\left| \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{R}{R_g} \right) \right| > 0. \quad (22)$$

Розв'язок рівняння (18) описує залежність вихідної напруги автогенератора від часу

$$u(t) = A \exp(x_1 t) + B \exp(x_2 t), \quad (23)$$

де x_1 і x_2 визначається виразами (20), A і B сталі інтегрування, які знаходяться з початкових умов.

Розглянемо вплив температури на характеристики тунельно-резонансного діода. При дії температури на діод змінюється енергія електронів у квантовій ямі, що приводить до зміни ефективної маси електронів, а також зміни квантових станів електронів.

Ці явища викликають зміну коефіцієнта прозорості потенціальних бар'єрів, що, у свою чергу, приводить до зміни струму через діод. Зміна струму діода викликає зміну як піків струму і напруги, так і їх долин. Отже, при зміні температури діода змінюються всі параметри еквівалентної схеми діода, що викликає зміну вихідної частоти сенсора температури. Проте їх вклад у зміну вольт-амперної характеристики сенсора є різним. На основі аналітичних формул омичного опору R , індуктивності L , ємності і диференційного від'ємного опору R_g розрахуємо їх зміну від прикладеної температури.

Опір R складається з опорів виводів, омичних контактів і опору розтікання підкладки

$$R = \rho / 2d, \quad (24)$$

де ρ – питомий опір провідника, d – діаметр перерізу діода.

Власні ємність C та індуктивність L діода визначається формулами [24]

$$C = \frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 u^2}, \quad (25)$$

$$L = \frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 i^2}, \quad (26)$$

де h – стала Планка, n – кількість енергетичних рівнів у квантовій ямі діода, m^* – ефективна маса електрона, a – ширина квантової ями, u та i – відповідно змінні напруга і струм діода. Від'ємний диференційний опір у робочій точці вольт-амперної характеристики сенсора має вигляд

$$R_g = -\frac{u}{i}. \quad (27)$$

Виходячи із загальних математичних міркувань зміни функції від зміни її аргументів, зміну параметрів сенсора від температури можна подати у наступному вигляді

$$\Delta R(T) = \frac{\partial R}{\partial d} \Delta d(T) + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho(T), \quad (28)$$

$$\Delta C(T) = \frac{\partial C}{\partial m^*} \Delta m^*(T) + \frac{\partial C}{\partial a} \Delta a(T) + \frac{\partial C}{\partial u} \Delta u(T) + \frac{\partial C}{\partial n} \Delta n(T), \quad (29)$$

$$\Delta L(T) = \frac{\partial L}{\partial m^*} \Delta m^*(T) + \frac{\partial L}{\partial a} \Delta a(T) + \frac{\partial L}{\partial i} \Delta i(T) + \frac{\partial L}{\partial n} \Delta n(T), \quad (30)$$

$$\Delta R_g(T) = -\left(\frac{\partial R_g}{\partial i} \Delta i(T) + \frac{\partial R_g}{\partial u} \Delta u(T) \right), \quad (31)$$

Виконавши необхідні перетворення у формулах (28)–(31), отримаємо

$$\Delta R(T) = \frac{1}{2d} \Delta \rho(T) - \frac{\rho}{2} \frac{1}{d^2} \Delta d(T), \quad (32)$$

$$\Delta C(T) = -\frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 u^2} \Delta m^*(T) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 u^2} \Delta a(T) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 u^2} \Delta u(T) + \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 u^2} \Delta n(T), \quad (33)$$

$$\Delta L(T) = -\frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 i^2} \Delta m^*(T) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 i^2} \Delta a(T) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 i^2} \Delta i(T) + \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 i^2} \Delta n(T), \quad (34)$$

$$\Delta R_g(T) = \frac{u}{i^2} \Delta i(T) - \frac{1}{i} \Delta u(T), \quad (35)$$

Аналіз формул (32)–(35) показує, що найбільший вплив зміни температури діє на диференційний від'ємний опір, оскільки власні ємність і індуктивність діода також змінюються від дії температури, проте їх зміни в порівнянні із зовнішньою ємністю та індуктивністю на чотири порядки менше, тому їх зміни не враховуємо. Таким чином, зміна диференційного від'ємного опору викликає зсув частоти генерації автогенератора сенсора температури.

Резонансна частота автогенератора сенсора температури визначається на основі формули вхідного імпедансу схеми (рис. 3). Формула імпедансу має вигляд

$$Z_{\text{вх}} = R + \frac{-\frac{R_g L}{C} - \frac{R_g}{\omega C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - j \frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (36)$$

У режимі резонансу уявна складова виразу (36) дорівнює нулю

$$\frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = 0. \quad (37)$$

З рівняння (37) визначаємо резонансну частоту, яка описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(T)}{L^2}}, \quad (38)$$

У виразі (38) тільки від'ємний диференційний опір залежить від температури, на зовнішні ємність і індуктивність температура не діє. Графік залежності зміни резонансної частоти від температури подано на рис. 4. Цей графік є функцією перетворення сенсора температури. Як видно з рис. 4, відбувається нелінійне зростання частоти від $4,02 \cdot 10^9$ Гц до $4,09 \cdot 10^9$ Гц при зміні температури від -150 °C до 50 °C. Це пояснюється зменшенням від'ємного диференційного опору в цьому діапазоні температур.

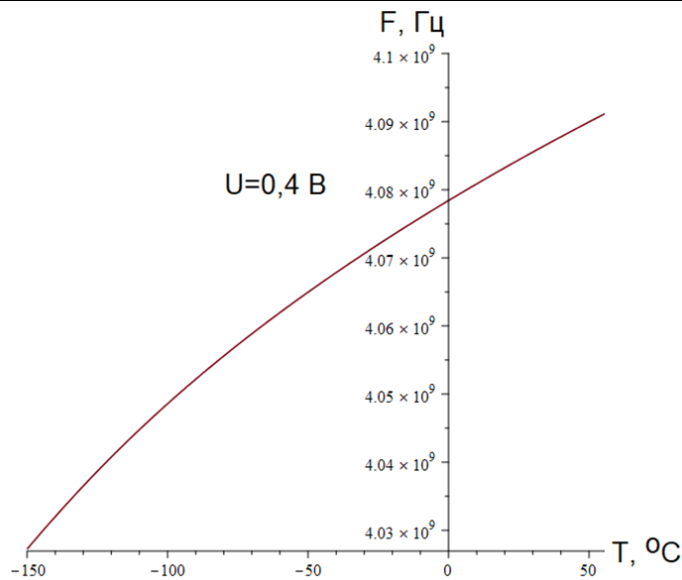


Рис. 4. Залежність зміни резонансної частоти від температури

Чутливість сенсора тиску визначається першою похідною функції перетворення (38) за зміною температури. Її розмірність відповідає відношенню Гц/ $^{\circ}\text{C}$. На рис. 5 надано розрахункову залежність функції чутливості сенсора від зміни температури. Її аналітичний вираз описується рівнянням

$$S = - \frac{R_g(T) \left(\frac{\partial R_g(T)}{\partial T} \right)}{2\pi L^2 \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(T)}{L^2}}} \quad (39)$$

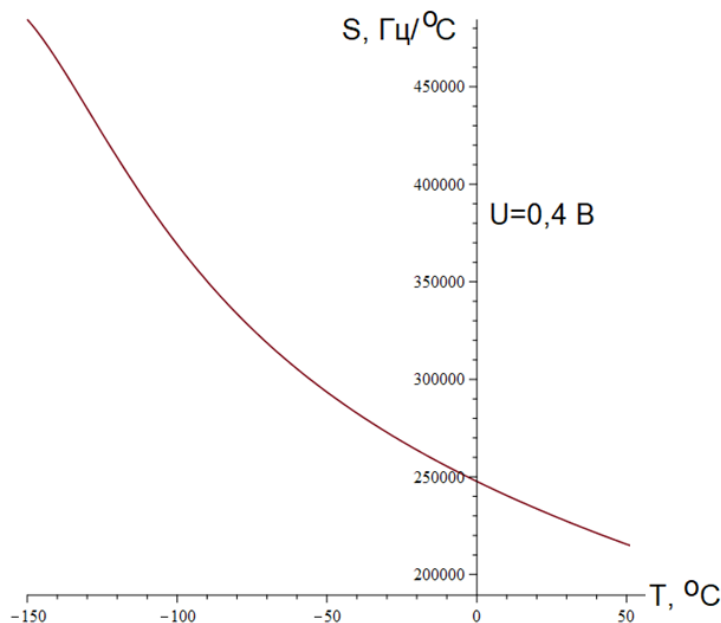


Рис. 5. Розрахункова залежність чутливості сенсора від температури

Як видно з графіка (рис. 5), величина чутливості має нелінійний характер і зменшується від 480 $\text{кГц}/^{\circ}\text{C}$ до 220 $\text{кГц}/^{\circ}\text{C}$ при зміні температури в діапазоні від $-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В області низьких температур сенсор має більшу чутливість внаслідок більш різкої зміни від’ємного диференційного опору зі зменшенням температури.

Висновки

Виходячи з розгляду фізичних процесів, розроблено математичну модель сенсора температури на тунельно-резонансному діоді, на основі якої визначено аналітичні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна енергії електронів в квантовій гетероструктурі тунельно-резонансного діода при дії температури. Це призводить до зміни

від'ємного диференційного опору, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту сенсора температури. Чутливість сенсора температури змінюється від 480 кГц/°С до 220 кГц/°С в діапазоні зміни температури від -150°С до 50°С. Вихідна частота при цьому змінювалась від $4,02 \cdot 10^9$ Гц до $4,09 \cdot 10^9$ Гц.

На основі еквівалентної схеми сенсора визначено аналітичні зміни всіх її елементів від дії температури. Показано, що сенсори температури з частотним виходом на основі тунельно-резонансних діодів мають суттєві переваги. Ці переваги зв'язано з можливістю працювати у надвисокочастотному діапазоні, у підвищення точності виміру температури, з безпроводною передачею інформації на відстань, мікромініатюризації сенсора аж до нанорозмірів, простість його конструкції.

Література

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Джексон Р.Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 p.
3. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21-23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
5. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / за ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-прес, Т.2, 2002. – 475 с.
6. Andreas Pfenning, Fabian Hartmann, Mariama Rebello Sousa Dias and all. Nanothermometer Based on Resonant Tunneling Diodes: From Cryogenic to Room Temperatures. ACS Nano 2015, 9, 6, P. 6271–6277.
7. Man Mohan Singh, M.J. Siddiqui. Electrical characterization of triple barrier GaAs/AlGaAs RTD with dependence of operating temperature and barrier lengths. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 58, P. 89–95.
8. Castro Pablo and Lecuna, Ramón, Manana Mario, Martin Maria Jose and Campo Dolores. Infrared Temperature Measurement Sensors of Overhead Power Conductors. Sensors, Vol. 20, 2020, N. 24, 7126.
9. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2015. Volume: 3 Issue: 8. P. 5224–5228.
10. Осадчук В. С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В. С., Осадчук О. В. – Винница : Универсум-Винница, 1999. – 275 с.
11. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskaya O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R93(3). P. 113–116.
14. Altet Josep, Barajas Enrique, Mateo Diego, Billong Alexandre, Aragones Xavier and Perpiñà Xavier. PF-Based Thermal Sensor Circuit for On-Chip Testing of RF Circuits. Sensors 2021, 21, N3. 805. DOI: 10.3390/s21030805
15. Yang Bo, Hu Di, Wu Lei. Design and Analysis of a New Hair Sensor for Multi-Physical Signal Measurement. Sensors 2016, Vol.16, N. 7, 1056. DOI: 10.3390/s16071056
16. Adwait A. Borwankar, Ajay S. Ladkat, Manisha R. Mhetre. Thermal Transducers Analysis. National Conference on, Modeling, Optimization and Control, 4th – 6th March 2015, NCMOC – 2015.
17. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S. and Semenov A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. – P. 452-457. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235474.
18. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007; P. 435–455.
19. Esaki L., Tsu R. Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors. IBM J. Res. Develop, vol.14. P. 61–65. Jan., 1970.
20. Jian Pind Sun, George J. Haddad, Pinaki Mazumder and Joel N. Schulman. Resonant Tunneling Diodes: Models and Properties. Proceedings of The JEEE, vol. 86, N. 4, April 1998. P. 641–661.
21. Tsu R., Esaki L. Tunneling in a finite superlattice. Appl. Phys. Lett., Vol. 22. P. 562–564. June, 1973.
22. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Рueda. – Москва : Техносфера, 2007. – 368 с.
23. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей : учебное пособие для вузов / Андреев В. С. – Москва : Радио и связь, 1982. – 280 с.

24. Осадчук О.В. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода / О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020 (287). – Том 1. № 4. – С. 160–167.

References

1. Jackson R.G. Latest sensors. – Moscow: Technosphere, 2007. – 384 p.
2. Schaumburg H. Sensoren. – Stuttgart.: Teubner, 1992. – 517 p.
3. Sensors: Reference Manual / Under total. ed. V.M. Sharapova, E.S. Polishchuk. Moscow: Technosphere, 2012. – 624 p.
4. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
5. Microelectronic sensors of physical quantities / Ed. Z. Yu. Gotra. – Lviv: League - Press, vol. 2, 2002. – 475 p.
6. Andreas Pfenning, Fabian Hartmann, Mariama Rebello Sousa Dias and all. Nanothermometer Based on Resonant Tunneling Diodes: From Cryogenic to Room Temperatures. ACS Nano 2015, 9, 6, P.6271–6277.
7. Man Mohan Singh, M.J. Siddiqui. Electrical characterization of triple barrier GaAs/AlGaAs RTD with dependence of operating temperature and barrier lengths. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 58, P. 89-95.
8. Castro Pablo and Lecuna, Ramón, Manana Mario, Martin Maria Jose and Campo Dolores. Infrared Temperature Measurement Sensors of Overhead Power Conductors. Sensors, VOL.20, 2020, N.24, 7126.
9. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2015. Volume: 3 Issue: 8. P. 5224-5228.
10. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. 275 p.
11. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R93(3), –P.113–116.
14. Altet Josep, Barajas Enrique, Mateo Diego, Billong Alexandre, Aragonés Xavier and Perpiñà Xavier. PF-Based Thermal Sensor Circuit for On-Chip Testing of RF Circuits // Sensors 2021, 21, N3. 805. Doi: 10.3390/s21030805
15. Yang Bo, Hu Di, Wu Lei. Design and Analysis of a New Hair Sensor for Multi-Physical Signal Measurement. Sensors 2016, Vol.16, N.7, 1056. DOI: 10.3390/s16071056
16. Adwait A. Borwankar, Ajay S. Ladkat, Manisha R. Mhetre. Thermal Transducers Analysis. National Conference on, Modeling, Optimization and Control, 4th – 6th March 2015, NCMOC – 2015.
17. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S. and Semenov A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. P. 452-457, DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235474.
18. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007; P. 435–455.
19. Esaki L., Tsu R. Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors. IBM J. Res. Develop, vol.14, P. 61-65. Jan., 1970.
20. Jian Pind Sun, George J. Haddad, Pinaki Mazumder and Joel N. Schulman. Resonant Tunneling Diodes: Models and Properties. Proceedings of The JEEE, vol.86, N.4, April 1998, P. 641-661.
21. Tsu R., Esaki L. Tunneling in a finite superlattice. Appl. Phys. Lett., Vol. 22. P. 562-564. June, 1973.
22. Martinez-Duart J.M. Nanotechnology for micro- and optoelectronics / J.M. Martinez-Duart, R.J. Martin-Palma, F. Agullo-Rueda. Moscow: Technosphere, 2007. 368 p.
23. Andreev V.S. Theory of nonlinear electrical circuits: Textbook for universities. Moscow: Radio and communication, 1982. 280 p.
24. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Investigation of reactive properties of tunnel resonance diode. Herald of Khmelnytskyi National University. Volume 1. № 4, 2020 (287). P. 160–167.

Надійшла/Paper received : 16.04.2021 p. Надрукована/Printed : 02.06.2021 p.