

О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук

Математична модель частотного перетворювача тиску на основі резонансно - тунельного діода

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, osadchuk.av69@gmail.com

У роботі представлено перетворювач тиску з частотним вихідним сигналом, що базується на фізичних процесах у резонансно-тунельному діоді під дією тиску. Використання приладів з від'ємним диференціальним опором дозволяє значно спростити конструкцію сенсорів тиску у всьому радіочастотному діапазоні. Залежно від режимів роботи сенсора вихідний сигнал може бути отриманий у вигляді гармонійних коливань. Дослідження характеристик сенсора тиску базується на повній еквівалентній схемі резонансного тунельного діода, що враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Розроблено математичну модель сенсора тиску, на основі якої визначено аналітичні залежності зміни елементів тунельно-резонансного діода від тиску, а також функції перетворення та чутливості сенсора. Показано, що основний внесок у зміни функції перетворення та чутливості сенсора вносить зміна від'ємного диференціального опору зі зміною тиску. Це, у свою чергу, приводить до різних значень вихідної частоти приладу. Чутливість сенсора змінювалася від 1,15 кГц/Па·10⁵ до 14,16 кГц/Па·10⁵ в діапазоні тиску від 50·10⁵ Па до 350·10⁵ Па.

Ключові слова: резонансний тунельний діод; тиск; від'ємний диференціальний опір; частота; квантова гетероструктура з подвійним бар'єром.

Подано до редакції 25.01.2022; прийнято до друку 02.05.2022.

Вступ

Створення та розвиток молекулярно-променевої епітаксіальної технології слугувало основою для створення нових нанoeлектронних пристроїв на основі квантових гетероструктур. Одним з таких пристроїв є резонансно-тунельні діоди. Вони мають мікрохвильові властивості та від'ємний диференціальний опір. Ці властивості тунельних резонансних діодів використовуються для побудови різноманітних сенсорів фізичних величин, зокрема сенсорів тиску [1-3]. Це приводить до можливості побудови автогенеруючого пристрою, в якому напівпровідниковий діод одночасно виступає як і первинний сенсор тиску. Це значно спрощує конструкцію сенсора. Залежно від режимів роботи можна реалізувати сенсори як з вихідними синусоїдальними коливаннями, так і з імпульсними коливаннями спеціальної форми у всьому діапазоні

радіочастот.

Частотний принцип роботи сенсорів тиску має ряд переваг: висока точність вимірювання; висока завадостійкість; простота конструкції; відсутність впливу вимірювальних каналів один на інший; можливість передачі вимірювальної інформації на відстань бездротового зв'язку; відсутність необхідності використання аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці інформаційних сигналів; можливість створення «інтелектуальних» сенсорів тиску. Ці переваги є вагомим приводом для проведення широких досліджень властивостей резонансно-тунельних діодів не лише як сенсорів тиску, а й як генераторів, перемикачів, логічних елементів, резонансних підсилювачів, пристроїв пам'яті тощо [4-6]. Однак щодо сенсорів тиску на основі резонансно-тунельних діодів, то математична модель, яка описує аналітичні залежності всіх елементів еквівалентної схеми від тиску, ще повністю не розроблена. Ці залежності, у

свою чергу, визначають залежність вихідної частоти та чутливість сенсора до тиску [7-9]. Вирішенню цих проблем присвячена дана робота.

I. Матеріали та методи

Побудована математична модель сенсора тиску з урахуванням фізичних явищ у діоді. Робота резонансних тунельних діодів заснована на квантових ефектах. Суть ефектів полягає в квантуванні енергії електронів при їх рухові через квантову яму і потенціальні бар'єри.

Дослідження сенсорів тиску на основі резонансних тунельних діодів вимагає знання фізичних процесів, будови діода, математичної моделі вольт-амперної характеристики, генераторів, а також режимів роботи. Тому спочатку необхідно розглянути ці питання. Теоретичні та експериментальні дослідження тунельно-резонансних діодів починаються з розробки математичної моделі вольт-амперної характеристики, що впливає з фізичних процесів тунелювання електронів через потенціальні бар'єри.

Розглянемо типову квантову структуру AlAs-GaAs-AlAs, фізичні процеси під час перпендикулярного руху електронів через потенціальні бар'єри та квантову яму на основі енергетичних діаграм зон провідності та валентної зони резонансного тунельного діода при різних значеннях прикладеної напруги. Потенціальні бар'єри та квантова яма між ними формуються за рахунок різних значень ширини заборонених зон для напівпровідникових з'єднань GaAs і AlAs, що приводить до порушення енергетичних рівнів дна зони провідності та вершини валентної зони. [7, 11-13]. Прикладання зовнішньої напруги на електроди емітер-колектор квантової гетероструктури приводить до зміни величини тунелювання електронів через потенціальні бар'єри та квантову яму, що викликає зміну величини струму через структуру.

II. Математична модель сенсора тиску

Переходимо до розгляду реактивних елементів резонансного тунельного діода, виходячи з його еквівалентної схеми [11]. Реактивні елементи включають ємність та індуктивність приладу. На рис. 1 показана еквівалентна схема резонансного тунельного діода.

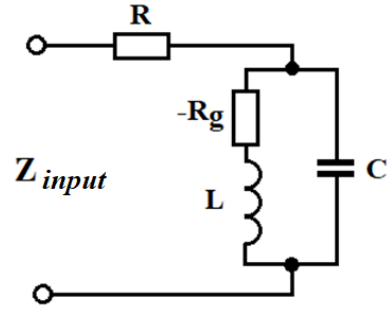


Рис. 1. Еквівалентна схема резонансно-тунельного діода: R – опір втрат; R_g – від'ємний диференціальний опір; C – ємність діода; L – індуктивність діода [12, 14].

Індуктивність резонансного тунельного діода пов'язана з кінцевою швидкістю рухомих електронів і вона завжди існує в діоді за будь-яких умов. Це пояснюється тим, що напруга на емітері, яка змушує електрони рухатися через пристрій, випереджає струм, тобто струм завжди відстає від напруги, що еквівалентно індуктивній реакції резонансного тунельного діода. Виходячи з фізичних законів квантової механіки, розраховуємо формулу індуктивності. Енергія електронів у квантовій ямі, з одного боку, визначається другою складовою у формулі [8]:

$$E(K_x, K_y, n) = \frac{\hbar^2}{2m^*} (K_x^2 + K_y^2) + E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} (K_x^2 + K_y^2) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* a^2} n^2, \quad n = (1, 2 \dots), \quad (1)$$

і вона дорівнює енергії магнітного поля, отже:

$$\frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* a^2} = \frac{Li^2}{2}, \quad (2)$$

де L – індуктивність еквівалентної схеми резонансного тунельного діода, i – струм діода. З формули (2) можна визначити значення індуктивності:

$$L = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{m^* a^2 i^2} = \frac{\hbar^2 n^2}{4a^2 m^* i^2} \quad (3)$$

З іншого боку, енергія електронів у квантовій ямі дорівнює енергії електричного поля,

$$\frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* a^2} = \frac{CU^2}{2}, \quad (4)$$

де U – напруга, що подається на резонансний тунельний діод. З виразу (4) можна отримати значення ємності:

$$C = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{m^* a^2 U^2} = \frac{\hbar^2 n^2}{4m^* a^2 U^2} \quad (5)$$

Перевірити справедливості формул (3) і (5) можна, якщо обчислити еквівалентну ємність та індуктивність за повним вхідним опором еквівалентної схеми (рис. 1). Таким чином, значення ємності резонансного тунельного діода має вигляд:

$$C = \frac{L}{\omega^2 L^2 + R^2} \quad (6)$$

Розрахунки ємності C , за формулою (6) від прикладеної напругу наведені на рис. 2.

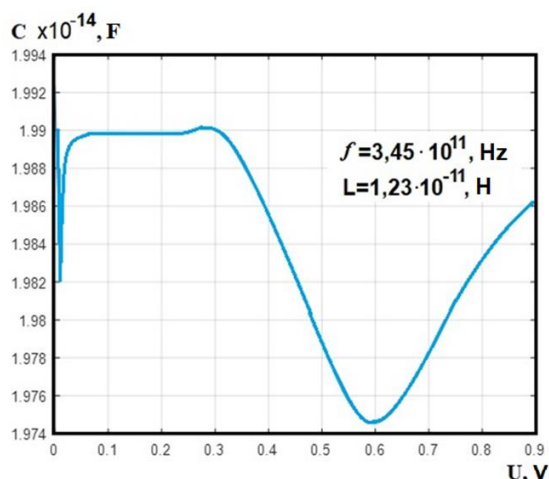


Рис. 2. Залежність внутрішньої ємності резонансного тунельного діода від прикладеної напруги.

Як видно, величина ємності постійна в діапазоні напруг від нуля до 0,3 В. На ділянці від 0,3 В до 0,6 В вона надходить майже лінійно, а потім після напруги 0,6 В до 0,9 В зростає. Така поведінка ємності від напруги пояснюється зміною від'ємного диференціального опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Порівняння величини ємності, розрахованої за формулою (5) і (6) при прикладеному значенні напруги 0,4 В, збігається з точністю другої цифри, тобто з точністю 0,01 %.

Значення індуктивності L резонансного тунельного діода визначається на основі виразу:

$$L = \frac{\frac{1}{c} - \sqrt{\frac{1}{c^2} - 4R_g^2 \omega^2}}{2\omega^2} \quad (7)$$

На рис. 3 показані розрахунки індуктивності за формулою (7).

Зміна величини індуктивності від прикладеної напруги пояснюється також її залежністю від зміни від'ємного диференціального опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Порівняння значення індуктивності, яке розраховується за формулами (3) і (7), збігається з точністю 0,01 % у точці з напругою 0,4 В. Тому резонансні тунельні діоди можна використовувати як регульовані ємнісні та індуктивні елементів в терагерцовому діапазоні частот, а їх добротність можна регулювати за рахунок від'ємного диференціального опору в інтервалах 100 і вище.

Зміна диференціального опору по всій шкалі прикладених напруг показано на рис. 4. Від'ємний диференціальний опір визначається діапазоном напруги від 0,3 В до 0,6 В. Його значення коливається від 80 Ом до 550 Ом. Така зміна диференціального опору від прикладеної напруги пояснюється ходом вольт-амперної характеристики

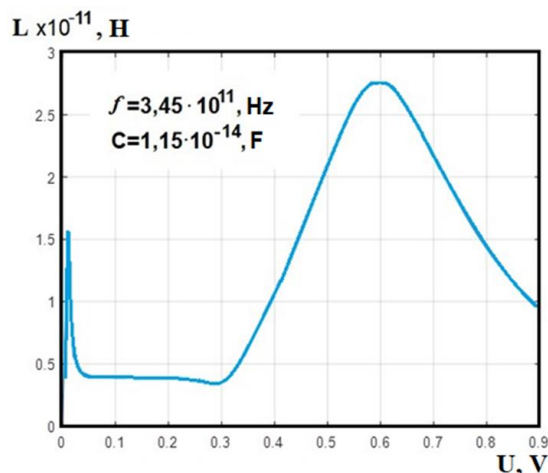


Рис. 3. Залежність внутрішньої індуктивності резонансного тунельного діода від прикладеної напруги.

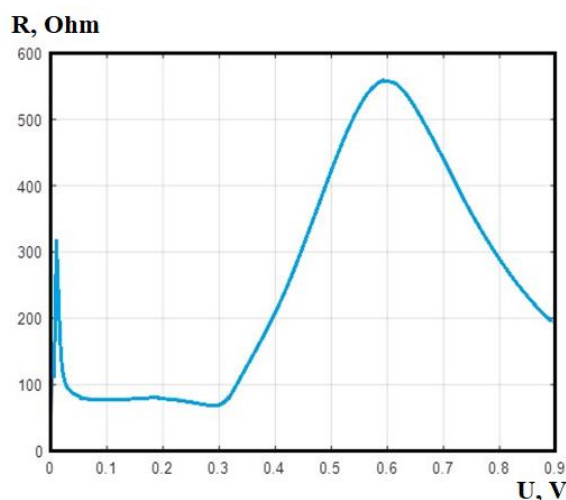


Рис. 4. Залежність диференціального опору резонансного тунельного діода від прикладеної напруги.

діода.

На рис. 5 представлена залежність зміни власної резонансної частоти резонансного тунельного діода від прикладеної напруги. Як видно з рис. 5, зі збільшенням напруги живлення діода частота зростає, на ділянці від 0,05 В до 0,2 В вона дещо стабілізується, при подальшому збільшенні напруги наближається до максимального значення, а на ділянці від 0,3 В до 0,6 В, де існує від'ємний диференціальний опір, вона різко падає з $5 \cdot 10^{11}$ Гц до $3,3 \cdot 10^{11}$ Гц. Така поведінка власної резонансної частоти діода пояснюється взаємним впливом диференціального від'ємного опору, ємності та індуктивності на частоту внаслідок їх зміни від напруги живлення.

Дані для теоретичного розрахунку параметрів елементів еквівалентної схеми для реальної структури резонансного тунельного діода: просторовий шар емітера n+GaAs – 7,6 нм, потенціальний бар'єр на стороні емітера AlAs – 5 нм, квантова яма GaAs – 6 нм, потенціальний бар'єр з боку колектора AlAs – 5 нм, просторовий шар колектор n+GaAs – 5 нм, площа структури – 25 μm^2 [7].

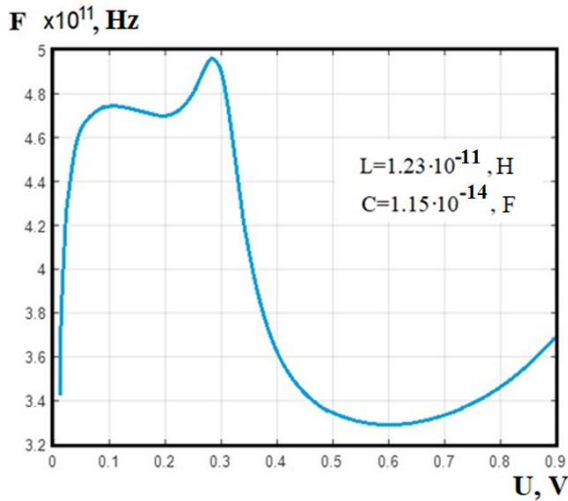


Рис. 5. Залежність власної резонансної частоти резонансного тунельного діода від зміни напруги живлення.

Розглянемо характеристики сенсора тиску. Електричну схему сенсора тиску подано на рис. 6. Живлення схеми здійснюється від джерела постійної напруги U_p . Схема сенсора складається з активного опору R , що включає всі омичні опори кола, зовнішньої індуктивності L , яка послідовно підключена до внутрішньої індуктивності діода, що також включає індуктивності виводів схеми, зовнішньої ємності C , яка підключена паралельно внутрішньої ємності діода, а також самого резонансно-тунельного діода.

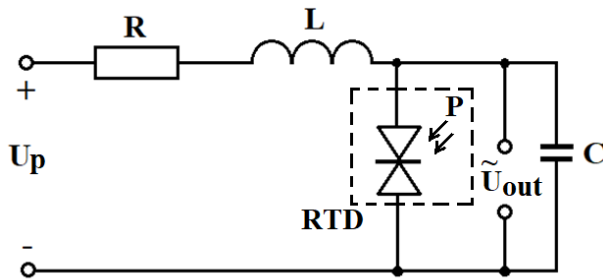


Рис. 6. Електрична схема сенсора тиску на основі резонансно-тунельного діода.

Еквівалентну схему сенсора для розрахунку його характеристик подано на рис. 7.

Джерело струму $I(U)$ в робочій точці сенсора на спадній ділянці вольт-амперна характеристика визначає співвідношення $U/I(U)$, що відповідає від'ємному диференціальному опору $-R_g$, тому в подальшому в еквівалентній схемі (рис. 7) замінюється на R_g .

Розглянемо вплив тиску на характеристики резонансного тунельного діода. Слід зазначити, що існує два діапазони тиску, які визначають характер зміни параметрів напівпровідникових приладів. Це високі тиски, при яких змінюється ширина

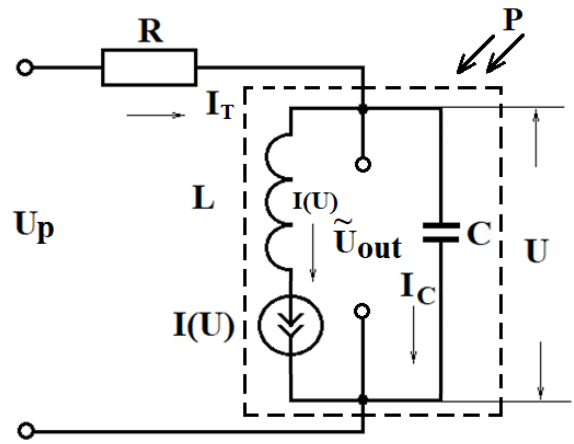


Рис. 7. Еквівалентна схема сенсора тиску з внутрішнім джерелом струму $I(U)$.

забороненої зони $E_g > kT$, і низький тиск, коли $E_g < kT$, де kT є теплова енергія. При високих тисках відбувається розщеплення енергетичних смуг, перерозподіл між екстремумами носіїв заряду. При цьому основним фактором, що змінює параметри резонансного тунельного діода, є деформаційна зміна ширини забороненої зони. Якщо тиски малі, то зміни зсуву струму відбуваються за рахунок зміни ефективних мас і рухливості заряду носіїв струму від змін тиску. Автори [2, 13, 15] показують, що вольт-амперні характеристики двобар'єрних резонансних тунельних пристроїв можуть бути змінені внутрішніми поляризаційними полями за рахунок п'єзоелектричного ефекту, викликаного зовнішніми одновісними напругами. Електричні поляризаційні поля, перпендикулярні до кордонів розділу, виникають у діодах, вирощених на підкладках з $\langle 001 \rangle$ орієнтацією при одновісних напругах стиснення паралельно орієнтації кристала $\langle 111 \rangle$ [16, 17]. Напруги, при яких виникають піки резонансного тунельного струму, чутливі до поляризаційних полів, викликаних зовнішніми тисками. Пікова напруга може зміщуватися в бік більш позитивної або негативної напруги залежно від напрямку прикладеного тиску [16]. Під дією зовнішнього тиску на діод змінюється як ефективна маса електронів, так і генерація п'єзоелектричних полів у квантовій ямі та потенціальних бар'єрах структури діода [2, 13]. Гідростатичний тиск викликає зміну ефективної маси електронів у квантовій ямі. Це приводить до зміни розташування енергетичних рівнів у квантовій ямі. Застосування до діода одновісного або двовісного тиску приводить до більшої зміни енергій електронів, ніж зміна їх ефективних мас за рахунок впливу п'єзоелектричних полів [2, 17]. Зміна енергії електронів діода під дією тиску змінює форму вольт-амперної характеристики. Це, у свою чергу, приводить до зміни частоти електричних коливань у сенсорі тиску [14].

На основі еквівалентної схеми сенсора тиску (рис. 7) розраховуємо зміни його параметрів від тиску.

Всі параметри резонансного тунельного діодного сенсора залежать від тиску. Їх внесок у зміну вольт-амперної характеристики сенсора різний. На основі

аналітичних формул для омичного опору R , індуктивності L , ємності C і диференціального від'ємного опору R_g визначимо їх зміну від прикладеного тиску.

Опір R складається з опорів клем, омичних контактів та опору розтікання підкладки:

$$R = \rho / 2d, \quad (8)$$

де ρ – питомий опір напівпровідника, d – діаметр ділянки діода. Внутрішня ємність діода C та індуктивність L визначаються виразами (5) і (3).

Від'ємний диференціальний опір в робочій точці діода має вигляд:

$$R_g = -\frac{U}{I}, \quad (9)$$

де U, I – напруга і струм в робочій точці вольтамперної характеристики сенсора.

Виходячи з загальних математичних міркувань, зміни параметрів сенсора від тиску можна представити у такому вигляді:

$$\Delta R(P) = \frac{\partial R}{\partial a} \Delta d(P) + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho(P) \quad (10)$$

$$\Delta C(P) = \frac{\partial C}{\partial m^*} \Delta m^*(P) + \frac{\partial C}{\partial a} \Delta a(P) + \frac{\partial C}{\partial U} \Delta U(P) + \frac{\partial C}{\partial n} \Delta n(P) \quad (11)$$

$$\Delta L(P) = \frac{\partial L}{\partial m^*} \Delta m^*(P) + \frac{\partial L}{\partial a} \Delta a(P) + \frac{\partial L}{\partial I} \Delta I(P) + \frac{\partial L}{\partial n} \Delta n(P) \quad (12)$$

$$\Delta R_g(P) = -\left(\frac{\partial R_g}{\partial I} \Delta I(P) + \frac{\partial R_g}{\partial U} \Delta U(P) \right) \quad (13)$$

Зробивши необхідні перетворення у формулах (10) – (13), отримуємо:

$$\Delta R(P) = \frac{1}{2d} \Delta \rho(P) - \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{d^2} \Delta d(P) \quad (14)$$

$$\Delta C(P) = -\frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 U^2} \Delta m^*(P) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^3 U^2} \Delta a(P) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 U^3} \Delta U(P) + \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 U^2} \Delta n(P) \quad (15)$$

$$\Delta L(P) = -\frac{h^2 n^2}{4m^* a^2 I^2} \Delta m^*(P) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^3 I^2} \Delta a(P) - \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 I^3} \Delta I(P) + \frac{h^2 n^2}{2m^* a^2 I^2} \Delta n(P) \quad (16)$$

$$\Delta R_g(P) = \frac{U}{I^2} \Delta I(P) - \frac{1}{I} \Delta U(P) \quad (17)$$

Аналіз формул (14) – (17) показує, що зміна тиску має найбільший вплив на диференціальний від'ємний опір. Як показали розрахунки, зміна внутрішньої ємності складає $0,15 \cdot 10^{-14}$ F, індуктивності $0,13 \cdot 10^{-11}$ H і від'ємного диференційного опору 12,3 Ом від дії

тиску в досліджуваному діапазоні. Оскільки величини зміни внутрішньої ємності та індуктивності на п'ять – сім порядків менше зовнішньої ємності ($0,37 \cdot 10^{-9}$ F) та індуктивності ($0,3 \cdot 10^{-4}$ H), тому вони не впливають на частоту автогенератора сенсора тиску. Від'ємний диференційний опір компенсує втрати енергії в коливальній системі, тому його зміна викликає зсув частоти генерації. Зміна зонних параметрів структури визначається експериментальним шляхом через зміну вольт-амперної характеристики та частотної характеристики сенсора при дії тиску на нього.

Резонансна частота генератора сенсора тиску визначається за формулою для повного вхідного опору сенсора (рис. 7). Формула повного опору описується виразом:

$$Z_{input} = R + \frac{-\frac{R_g L}{C} - \frac{R_g}{\omega C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - j \frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (18)$$

У резонансному режимі уявна складова виразу (18) дорівнює нулю

$$\frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = 0 \quad (19)$$

З рівняння (19) можна визначити резонансну частоту, яка описується виразом:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(P)}{L^2}} \quad (20)$$

У формулі (20) тільки диференціальний від'ємний опір залежить від тиску. Однак власна ємність та індуктивність тунельного резонансного діода також залежать від тиску. Зміна їх значень на п'ять – сім порядків менша щодо зовнішніх значень ємності та індуктивності коливального контуру автогенератора сенсора тиску, тому їх впливом нехтуємо.

Графік розрахункової залежності зміни резонансної частоти від тиску показаний на рис. 8. Цей графік є функцією перетворення сенсора тиску.

Чутливість сенсора тиску визначається першою похідною функції перетворення (20) щодо тиску, тобто дорівнює відношенню кГц/Па. На рис. 9 представлена розрахункова залежність функції чутливості сенсора від прикладеного тиску. Його аналітичний вираз є складним і може бути описаний наступним рівнянням

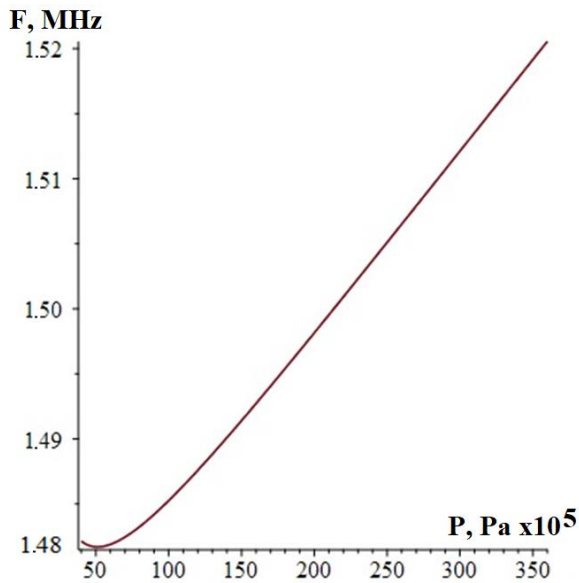


Рис. 8. Розрахункова залежність зміни резонансної частоти від тиску.

$$S_p = - \frac{R_g(P) \left(\frac{dR_g(P)}{dP} \right)}{2\pi L^2 \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(P)}{L^2}}} \quad (21)$$

Конструкція сенсора складається з мембрани, яка витравлена на кремнієвій підкладці. На мембрані вбудований резонансний тунельний діод. Твердотільна ємність, індуктивність і резистор створюються на підкладці поруч з мембраною. Резистор забезпечує постійне живлення сенсора. Товщина діафрагми визначає діапазон вимірюваного тиску.

Як видно з графіка (рис. 9), значення чутливості коливається від 1,15 кГц/Па · 10⁵ до 14,16 кГц/Па · 10⁵ у діапазоні тисків від 50 · 10⁵ Па до 350 · 10⁵ Па. Поведінка функції чутливості від тиску пояснюється складною залежністю функції перетворення сенсора від зміни від'ємного диференціального опору під впливом тиску.

III. Обговорення

На основі розгляду фізичних процесів у резонансному тунельному діоді при дії тиску, автори запропонували сенсор тиску з частотним вихідним сигналом. Використання приладів з від'ємним диференціальним опором дозволяє значно спростити конструкцію сенсорів тиску у всьому радіочастотному діапазоні. Залежно від режимів роботи сенсора вихідний сигнал може бути отриманий як у вигляді гармонійних коливань, так і у вигляді імпульсних коливань.

Дослідження параметрів сенсора тиску базуються на еквівалентній схемі резонансного тунельного діода, що враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Вольт-амперна характеристика сенсора має спадну ділянку, що відповідає появі на цій ділянці від'ємного диференціального опору. Спадна ділянка виникає внаслідок зменшення струму, що

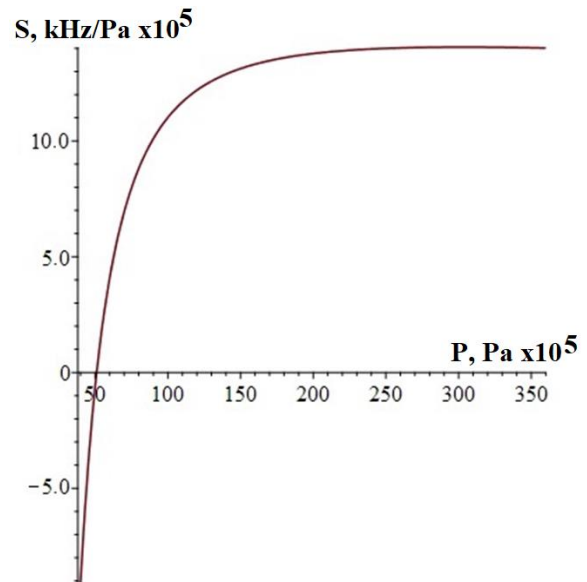


Рис. 9. Розрахункова залежність чутливості сенсора від тиску.

проходить через двобар'єрну квантову гетероструктуру. Це відбувається через зменшення коефіцієнта прозорості потенціальних бар'єрів за рахунок збільшення енергії електрона порівняно з рівнем енергетичного резонансу в квантовій ямі.

Розроблено математичну модель сенсора тиску, на основі якої визначено аналітичні залежності зміни елементів резонансного тунельного діода від тиску, а також функції перетворення та чутливості сенсора. Показано, що основний внесок у зміни функції перетворення та чутливості сенсора вносить зміна від'ємного диференціального опору при зміні тиску. Частотний принцип роботи сенсорів тиску дає можливість підвищити точність вимірювання, завадостійкість, збільшити амплітуду вихідного сигналу, а також дає можливість передачі інформаційного сигналу на великі відстані, можливість створення «інтелектуальних» сенсорів тиску.

Розглянемо можливі шляхи використання досліджуваних сенсорів тиску в різних галузях науки та промисловості. Однією з ключових проблем сучасного виробництва є інтеграція складних електронних та оптоелектронних функцій у м'які та тонкі волокна [18]. Багатофункціональні волоконно-оптичні пристрої ляжуть в основу розробки розумних тканин, хірургічних сенсорів та інструментів, робототехніки та протезів, систем зв'язку та портативних колекторів енергії. Очевидно, що в оптико-електронних хірургічних сенсорах і протезах, системах зв'язку знадобляться мікроелектронні сенсори тиску з частотним виходом.

Іншою областю застосування сенсорів тиску є самохідні наномотори (МНМ) для використання в біомедицині [19]. Комбінуючи розміри наномоторів з нанорозміром сенсора тиску, можна вирішити питання навігації та вимірювання тиску під час автономного руху наномотора.

Ще однією сферою застосування мікросенсора тиску є його можливе поєднання з мікро- і нанорозмірними металевими скелльцями для

створення імплантованого волоконно-оптичного зонда [20].

Висновки

Розроблено математичну модель сенсора тиску, на основі якої визначено аналітичні залежності функції перетворення та чутливості. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна енергії електронів у квантовій гетероструктурі тунельного резонансного діода під дією тиску. Це змінює від'ємний диференціальний опір, який, у свою чергу, змінює вихідну частоту сенсора тиску. Чутливість сенсора тиску змінюється від $1,15 \text{ кГц/Па} \cdot 10^5$ до $14,16 \text{ кГц/Па} \cdot 10^5$ в діапазоні зміни тиску від $50 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $350 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Вихідна частота змінювалася від $1,48 \text{ МГц}$ до $1,52 \text{ МГц}$.

На основі еквівалентної схеми сенсора тиску визначено аналітичні вирази для зміни всіх параметрів сенсора від тиску. Показано, що датчики тиску з частотним виходом на основі тунельних резонансних діодів мають значні переваги перед аналоговими сенсорами. Їх перевагами є можливість роботи в надвисокому діапазоні частот, точність вимірювання тиску, бездротова передача вимірюваної інформації на відстань, збільшення мікромініатюризації сенсора аж до нанорозмірів, простота конструкції сенсора.

Розглядаючи фізичні процеси в резонансному

тунельному діоді, визначено аналітичні формули внутрішньої ємності та внутрішньої індуктивності, які залежать від режиму його роботи. Виходячи з цих формул, розраховано їх залежності від режиму електропостачання за постійною напругою. Показано, що внутрішня ємність діода змінюється від $1,99 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}$ до $1,97 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}$ на спадній ділянці вольт-амперної характеристики, а зміна індуктивності лежить в межах від $0,5 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$ до $2,75 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.

Визначено аналітичну залежність власної резонансної частоти діода від режимів його роботи. Показано, що власна резонансна частота змінюється в області від'ємного диференціального опору від $4,8 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$ до $3,28 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$. Це пов'язано з кумулятивними ефектами змін ємності, індуктивності та від'ємного диференціального опору. Резонансні тунельні діоди можна використовувати як регульовані ємнісні та індуктивні елементи в терагерцовому діапазоні частот, а їх добротність можна регулювати за рахунок від'ємного диференціального опору в інтервалах від 100 і вище.

Осадчук О.В. – професор. д.т.н., завідувач кафедри радіотехніки;

Осадчук В.С. – професор. д.т.н., професор кафедри радіотехніки;

Осадчук Я.О. – к.т.н., доцент кафедри радіотехніки.

- [1] K. Mutamba, M. Flath, A. Sigurdardottir, A. Vogt, H.L. Hartnagel, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, A GaAs pressure sensor with frequency output based on resonant tunneling diodes 48(6), 1333 (1999); <https://doi.org/10.1109/19.816157>.
- [2] R. Fobelets, G. Borghs, Vounkx, *J. Micro-mech. Microend.*, A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes 4, 123 (1994).
- [3] J.D. Alberecht, L. Cond, P.P. Ruden, M.I. Nathan, L.L. Smith, *J. Appl. Phys.*, Resonant tunneling in (001) and (111) –oriented III-V double barrier heterostructures under transverse and longitudinal stress 79(10), 7763 (1996).
- [4] V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, I.A. Osadchuk, *Bulletin of the Khmelnytsky National University. Engineering Sciences*, Microelectronic pressure transducer with frequency output based on tunneling resonance diode, 1(221), 97 (2015).
- [5] I.A. Osadchuk, A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, A.O. Semenov, Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode, *Proc of IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 25-29.02.2020 (Lviv-Slavske, Ukraine, 2020). P. 452; <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235474>.
- [6] A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance Vol.13, N4 (2021); [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(4\).04001](https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04001).
- [7] I.T. Awan, Optical and Transport of pin GaAs-AlAs resonant tunneling diode. PhD thesis (Universidade Federal de São Carlos, Sao Carlos, 2014).
- [8] J.M. Martinez-Duart, R.J. Martin-Palma, F. Agullo-Rueda, *Nanotechnology for Micro- and Optoelectronics*, Technosphere (Moscow, Russia, 2007).
- [9] V.E. Borisenko, Physical foundations of nanoelectronics. Part 1 (BSUIR, Minsk, Belarus, 2001).
- [10] S.M. Sze, K. Ng, Kwok, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley-Interscience, Hoboken, USA, 2007).
- [11] H. Saadiah, W.M. Jubadi, N. Ahmad, M.H. Jabbar, *Journal of Physics: Conf. Series*, Resonant Tunneling Diode Design for Oscillator Circuit 1049, 012069 (2018).
- [12] A. Carlo, C.A. Di, P. Lugli, *Semicond. Sci. Technol.*, Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure 10, 1673 (1995).
- [13] J.P. Sun, G.J. Haddad, P. Mazumder, J.N. Schulman, *Proceedings of The IEEE*, Resonant Tunneling Diodes: Models and Properties 86(4), 641 (1998).

- [14] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, P. Kisała, T. Zyska, A. Annabaev, K. Mussabekov, *Przeegląd Elektrotechniczny*, Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor R 93(3), 113 (2017).
- [15] Tao Wei, Impedance, equivalent circuit and capacitance of double barrier resonant tunneling diode. Simon Fraser University (1994). P. 112.
- [16] Ryunosuke Izumi, Takumi Sato, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada, *AIP Advances*, Resonant-tunneling-diode terahertz oscillator with a cylindrical cavity for high-frequency oscillation 9, 085020, (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5114963>.
- [17] L. Cong, J.D. Albrecht, M.I. Nathan, and P.P. Ruden, *Journal of Applied Physics*, Piezoelectric effect in (001)- and (111)-oriented double-barrier resonant tunneling devices 79, 7770 (1996); <https://doi.org/10.1063/1.362382>.
- [18] W. Yan, A. Page, T. Nguyen-Dang, Y. Qu, F. Sordo, L. Wei, F. Sorin, *Advanced Multimerial Electronic and Optoelectronic Fibers and Textiles. Advanced Materials* 31, 1802348 (2019); <https://doi.org/10.1002/adma.201802348>.
- [19] Changyong Gao, Yong Wang, Zihan Ye, Zhihua Lin, Xing Ma, Qiang He, *Advanced Materials*, Biomedical Micro-/Nanomotors: From Overcoming Biological Barriers to In Vivo 2000512 (2020); <https://doi.org/10.1002/adma.202000512>.
- [20] W. Yan, I. Richard, G. Kurtuldu et al., *Nat. Nanotechnol.*, Structured nanoscale metallic glass fibres with extreme aspect ratios 15, 875, (2020); <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0747-9>.

A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk

Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, osadchuk.av69@gmail.com

The paper presents the design of pressure sensor with a frequency output signal that is based on the physical processes in a resonant tunnel diode under the action of pressure. The use of devices with negative differential resistance can significantly simplify the design of pressure sensors in the entire radio frequency range. Depending on the operating modes of the sensor, an output signal can be obtained in the form of harmonic oscillations. Pressure sensor characteristics researches based on complete equivalent circuit diagram resonant tunnel diode, which takes into account its capacitive and inductive properties. A mathematical model of the pressure sensor was developed, upon which the analytical dependences of the change in the elements tunnel resonance diode from pressure have been determined, as well as conversion functions and sensor sensitivity. 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 the change in pressure. This, in turn, results in different readings of the instrument's output frequency. The sensitivity of the sensor varied from $1.15 \text{ kHz/Pa} \cdot 10^5$ to $14.16 \text{ kHz/Pa} \cdot 10^5$ in the pressure range from $50 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ up to $350 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

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