

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОГО ДІОДА

*В статті надано характеристики мікроелектронного перетворювача тиску з частотним виходом у вигляді автогенераторної схеми на основі тунельно-резонансного діода, в якій діод є первинним перетворювачем тиску. На базі еквівалентної схеми перетворювача отримано залежність вихідного сигналу від часу, функцію перетворення і чутливість. Чутливість пристрою залежить від режиму живлення по постійному струму і величини тиску, що діє на перетворювач, вона змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.*

*Ключові слова: тунельно-резонансний діод, тиск, частота, від'ємний опір.*

V.S. OSADCHYK, A.V. OSADCHYK, Y.A. OSADCHYK

Vinnitsia National Technical University

### MICROELECTRONIC PRESSURE TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT ON THE BASIS OF TUNNEL RESONANCE DIODES

*Abstract - The article describes the characteristics of microelectronic pressure transducer frequency output in the form of self-oscillator circuit based on resonant tunnelling diode, in which the diode is the primary pressure transducer. Based on the equivalent circuit of the converter dependence of the output signal from the time conversion function and sensitivity. The sensitivity depends on the device's power DC and the pressure acting on the transducer, it varies from 2.25 kHz/kPa to 0.35 kHz/kPa.*

*Keywords: resonance tunnelling diode, pressure, frequency, negative resistance.*

#### Вступ

Напівпровідникові прилади, які мають від'ємний диференційний опір, можна використовувати для побудови різноманітних перетворювачів фізичних величин, зокрема перетворювачів тиску [1–3]. Вони дозволяють створювати одночасно автогенераторний пристрій, в якому сам напівпровідниковий прилад з від'ємним опором виступає первинним перетворювачем тиску. Таким приладом є тунельно-резонансний діод. Частотний принцип роботи сенсорів тиску має ряд переваг перед амплітудними, які полягають у високій завадостійкості, що приводить до високої точності вимірювання, а також мають високе значення вихідного частотного сигналу. Вимірювальні прилади з частотним вихідним сигналом дозволяють відмовитись від аналогово-цифрового перетворення і подальшого підсилення вихідного сигналу, що значно здешевлює системи вимірювання і контролю. Використання реактивних властивостей і від'ємного опору, що залежить від дії тиску у напівпровідникових структурах, дозволяє будувати мікроелектронні перетворювачі тиску, які легко узгоджуються з мікропроцесорними пристроями обробки сигналів, а у свою чергу дозволяє створювати "інтелектуальні сенсори".

Проте дослідження характеристик перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором лише починається, особливо це стосується новітніх розробок мікроелектронних приладів з від'ємним диференціальним опором, які працюють на основі квантово-механічних явищ, таких як тунельно-резонансні діоди [4].

#### Математична модель

Розглянемо принцип роботи тунельно-резонансного діода. Він працює на основі квантово-механічних ефектів, які полягають у квантуванні енергії електронів і їх тунелюванні через потенціальні бар'єри. Діод складається з наночарових структур  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ , які утворюють двобар'єрну гетероструктуру, в якій шар  $GaAs$  утворює потенціальну яму, що розташована між двома  $AlGaAs$  потенціальними бар'єрами. До двобар'єрної системи створюють з двох сторін шар  $n-GaAs$ , який слугує контактами, що поставляють електрони у прилад. В потенційній ямі структури розташовано резонансний енергетичний рівень. Якщо енергія електрона, який знаходиться у потенційній ямі співпадає або трохи більше енергії резонансного енергетичного рівня, то електрон тунелює через потенційну яму структури. При підвищенні прикладеної постійної напруги енергія електронів зростає і наближається до значення енергії резонансного рівня, що приводить до зростання струму. Подальше збільшення прикладеної напруги приводить до значного зростання енергії електронів, що суттєво перевищує енергію резонансного рівня, тому тунелювання електронів через потенційну яму різко зменшується, що приводить до значного зменшення струму. Таким чином, на вольт-амперній характеристиці діода утворюється спадаюча ділянка, тобто струм падає, а напруга зростає, що відповідає утворенню диференціального від'ємного опору [1, 4].

Розглянемо вплив тиску на характеристики тунельно-резонансного діода. При прикладенні зовнішнього тиску до діоду відбувається зміна ефективної маси електрона і генерації п'єзоелектричних полів у потенційній ямі і потенціальних бар'єрах структури. Гідростатичні тиски викликають зміну ефективної маси електронів, які змінюють розташування енергетичних рівнів у потенційній ямі. При прикладенні одновісних або двовісних тисків п'єзоелектричні поля індукують значно більший внесок в енергію електронів, ніж у зміну їх ефективних мас. Зміна енергетичних станів електронів внаслідок дії тиску

приводить до зміни вольт-амперної характеристики, а також до зміни частоти генерації [5–8].

Енергетична схема генератора подана на рис.1. Вона складається з джерела живлення з постійним струмом  $U_p$ , опору втрат  $R$ , індуктивності  $L$ , яка з'єднана послідовно з ємністю  $C$ , паралельно якій підключено тунельно-резонансний діод VD1. Для розрахунку вихідної змінної напруги автогенераторного сенсора тиску скористаємося його еквівалентною схемою, складеною на основі електричної схеми (рис.1). На рис. 2 надано еквівалентну схему сенсора тиску.

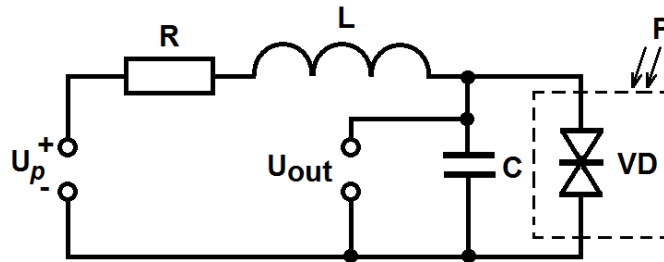


Рис.1. Електрична схема сенсора тиску на основі тунельно-резонансного діода з частотним вихідним сигналом

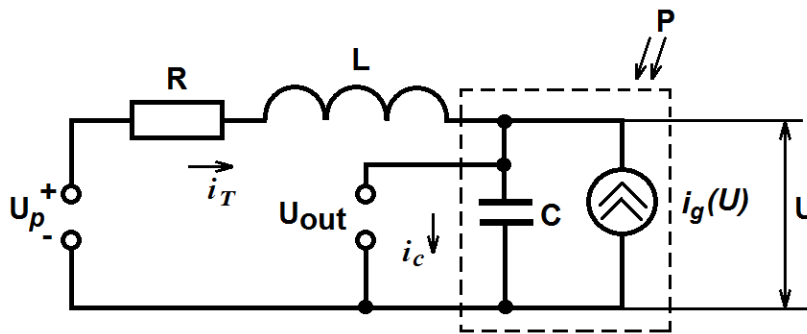


Рис.2. Еквівалентна схема сенсору тиску

На схемі (рис. 2) сумарна індуктивність  $L$  включає в себе зовнішню індуктивність коливального контуру та індуктивність виводів схеми, опір  $R$  включає в себе опір навантаження та опір виводів схеми, ємність  $C$  включає в себе зовнішню ємність коливального контуру і внутрішню ємність тунельно-резонансного діода. Розвиток процесів в цій схемі пов'язаний із зміною струму  $i_T$  і напруги  $U$ :

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - i_T - U}{L}, \tag{1}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C}. \tag{2}$$

Рівняння (1) і (2) можна об'єднати шляхом ділення першого на друге, тобто

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - i_T R - U}{i_T - I(U)} \cdot \frac{C}{L}. \tag{3}$$

В стані рівноваги ( $U_0, i_{T0}$ ) струми і напруги в схемі не змінюються, тому

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0, \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \tag{4}$$

Використовуючи умову (4) з рівнянь (1) і (2) знаходимо

$$U_p - i_{T0} R - U_0 = 0, \tag{5}$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \tag{6}$$

Стан схеми згідно (5) і (6) реалізується в точках перетину статичної вольт-амперної характеристики і лінією статичного навантаження схеми

$$I(U_0) = (U_p - U_0) / R, \tag{7}$$

який є станом рівноваги досліджуваної схеми. Для розгляду роботи схеми в динамічному режимі введемо в рівняння (1) і (2) нові змінні, які мають вигляд:

$$U = U - U_0, \tag{8}$$

$$i = i_T - i_{T0}. \tag{9}$$

Нелінійну статичну вольт-амперну характеристику тунельного резонансного діода поблизу стану рівноваги замінимо лінійною функцією

$$I(U_0 + u) = I(U_0) + u / R_g, \quad (10)$$

де  $R_g$  – диференційний від'ємний опір в точці рівноваги. Нелінійну смність на електродах тунельно-резонансного діода поблизу стану рівноваги вважають постійною величиною, яка не залежить від напруги. Враховуючи ці зауваження рівняння (1) і (2) перетворюються у лінійні з постійним коефіцієнтами:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}, \quad (11)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_g C}. \quad (12)$$

Для визначення характеристичного рівняння на основі (11) і (12) необхідно провести диференціювання напруги за часом у рівнянні (12)

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{di}{dt} \cdot \frac{1}{C} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (13)$$

Підставимо у вираз (13) замість  $di/dt$  його значення з (11), тобто

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \left( -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L} \right) \cdot \frac{1}{C} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (14)$$

З другого боку, згідно з еквівалентною схемою сенсора тиску (рис.2) можна записати

$$i = i_C + i_g, \quad (15)$$

де  $i_g = u/R_g$ . При підстановці (15) у (14) отримаємо рівняння

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (16)$$

Характеристичне рівняння системи має вигляд

$$x^2 + x \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (17)$$

Корені характеристичного рівняння визначаються з (17)

$$x_{1,2} = \frac{-\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right)^2 + \frac{4}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)}}{2} = 0. \quad (18)$$

Згідно з теорією стійкості Ляпунова, корені характеристичного рівняння (18) визначають стан рівноваги системи. Якщо  $x_1$  і  $x_2$  мають дійсні значення, то при  $x_{1,2} < 0$  будь-яке початкове відхилення в системі буде затухати за експонентним законом, а при  $x_{1,2} > 0$  – наростати. Якщо  $x_{1,2} = a \pm jb$  (комплексні величини), то в системі можливі синусоїдальні коливання, причому при  $a > 0$  коливання наростають, а при  $a < 0$  – затухають.

Розв'язок рівняння (16) можна записати у вигляді

$$u(t) = A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t + \\ + B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) - \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t, \quad (19)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти, які визначаються з початкових умов. Дві складові рівняння (19) описують періодичний процес, амплітуда якого наростає за експонентним законом. Умова виникнення синусоїдальних коливань в системі описується нерівностями

$$\left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right) < 0, \quad (20)$$

$$\frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) > 0. \quad (21)$$

Таким чином, збудження коливань на резонансній частоті у сенсорі тиску буде мати місце при виконанні умов (20) і (21). Резонансна частота визначається з повного вхідного опору (рис.2), який описується рівнянням

$$Z = R + \frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} + j \left( \omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right). \quad (22)$$

Під час виконання умови

$$\omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} = 0 \quad (23)$$

в схемі наступає резонанс. З рівняння (22) визначаємо резонансну частоту, тобто функцію перетворення, що описує залежність резонансної частоти від тиску:

$$F_p(P) = \frac{1}{2\pi R_g(P)C_{ekv}} \sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1}. \quad (24)$$

Чутливість сенсора тиску визначається з формули (24) і описується рівнянням

$$S_{P}^{F_p} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1} \left( \frac{dR_g(P)}{dP} \right)}{\pi R_g^2(P)C_{ekv}} + \frac{1}{2} \frac{\frac{dR_g(P)}{dP}}{\pi L \sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1}}. \quad (25)$$

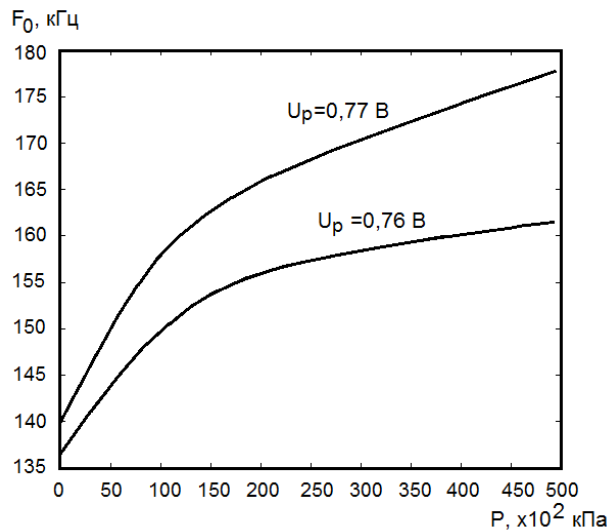


Рис. 3. Залежність частоти генерації від тиску

На рис.3 надано залежність частоти генерації від тиску. Як видно з графіка, частота зростає більш різко при малих тисках (до 150·10<sup>2</sup> кПа) і менших напругах живлення (0,76 В). Така поведінка функції перетворення, тобто, залежність частоти генерації від тиску, пояснюється зміною величини від'ємного опору і в меншій степені зміни еквівалентної ємності коливальної системи автогенератора.

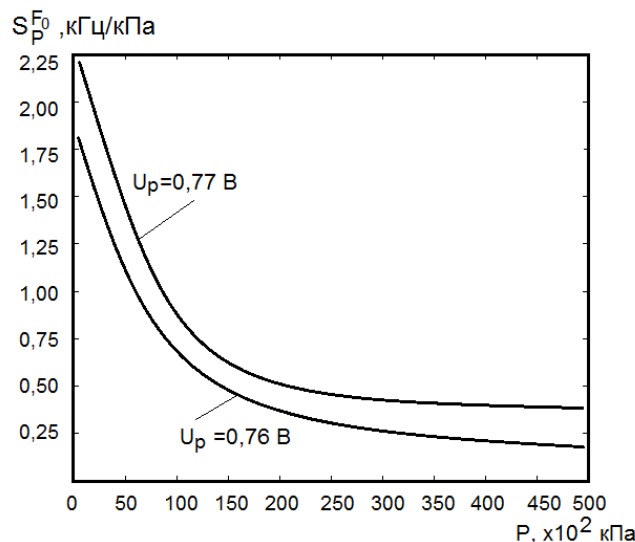


Рис. 4. Залежність чутливості від тиску

На рис.4 надано залежність чутливості від тиску. Аналіз цього графіка показує, що існують певні діапазони тиску і діапазони живлення з постійної напруги, при яких чутливість має максимальне значення і змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

### Висновки

На основі розв'язку рівняння коливальної системи тунельно-резонансного діода, який виступає в якості сенсора тиску, отримано функцію перетворення, що описує залежність частоти генерації від тиску, а також рівняння чутливості. Чутливість сенсора тиску змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

### Література

1. Гаряинов С.А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С.А. Гаряинов, М.Д. Абезгауз. – М. : Энергия, 1970. – 320 с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000. – 302 с.
3. Осадчук В.С. Сенсори тиску і магнітного поля / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2005. – 207 с.
4. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Атумао-Русда. – М. : Техносфера, 2007. – 368 с.
5. A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes / K. Fobelets, R. Vounckx, and Borghs. J. Micromech. Microeng. 4. pp.123–128, 1994.
6. Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure / A. Di Carlo and P. Lugli. Semicond. Sci. Technol., vol.10, pp.1673–1679, 1995.
7. Resonant tunneling in (001)- and (111)-oriented III-V double barrier heterostructures under transverse and longitudinal stresses / J.D. Albrecht, L.Cong, P.P. Ruden, M.I. Nathan and D.L. Smith. J. Appl. Phys. vol.79. no. 10, pp.7763-7769, May 1996.

### References

1. Garyainov S.A. Semiconductor devices with negative resistance / S.A. Garyainov, M.D. Abezgaуз - M.: Energy, 1970. - 320 p.
2. Osadchuk O.V. Microelectronic frequency transducers based on the transistor structures with negative resistance / O.V. Osadchuk – Vinnitsa, "Universum-Vinnitsa", 2000. – 303 p.
3. Osadchuk V.S. Pressure sensors and magnetic field / V.S.Osadchuk, O.V. Osadchuk - Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 2005. - 207 p.
4. Martinez-Duarte J. M. Nanotechnology for micro- and optoelectronics / J. M. Martinez-Duarte, R.J. Martin Palma, F. Atumao-Rusdem -M.: Technosphere, 2007. -368 p.
5. Fobelets K. A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes. K. Fobelets, R. Vounckx, and Borghs. J. Micromech. Microeng. 4. pp.123-128, 1994.
6. Di Carlo A. Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure / A. Di Carlo and P. Lugli. Semicond. Sci. Technol., vol.10, pp.1673-1679, 1995.
7. Albrecht J.D. Resonant tunneling in (001)- and (111)-oriented III-V double barrier heterostructures under transverse and longitudinal stresses / J.D. Albrecht, L.Cong, P.P. Ruden, M.I. Nathan and D.L. Smith. J. Appl. Phys. vol.79. no. 10, pp.7763-7769, May 1996.

Рецензія/Peer review : 25.12.2014 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., Кичак В.М.