УДК 621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н.; А. О. Кривошея, асп.

СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ ТЕНЗОЧУТЛИВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Проаналізовано напівпровідникові тензочутливі елементи: тензорезистори, тензодіоди, тензотранзистори, які покладено в основу сенсорів тиску, а також напівпровідникові сенсори тиску з частотним виходом на основі цих елементів. Показано вплив дії тиску на досліджені напівпровідникові структури.

Ключові слова: *сенсор, сенсори тиску, вимірювання тиску, тензочутливий елемент*

Вступ

Постійно зростаючі вимоги щодо автоматизації систем керування, діагностики та контролю різноманітних технологічних процесів зумовили інтенсивний розвиток різних за будовою та властивостями сенсорів тиску. При цьому дослідження в галузі створення таких сенсорів спрямовані на покращення їх основних параметрів: підвищення чутливості, лінійності, стабільності, економічності, зменшення часу спрацьовування, габаритів, ефективності інтеграції з мікропроцесорними засобами обробки вимірювальної інформації. Напівпровідникові сенсори тиску займають передові місця в цьому процесі [1 − 3].

У цій роботі досліджено напівпровідникові тензочутливі елементи, які покладено в основу різних за будовою та властивостями сенсорів тиску, а також напівпровідникові сенсори тиску з частотним виходом на основі цих елементів.

1. Тензорезистори

Найпростішим за будовою є тензочутливий елемент на основі тензорезисторів [1, 2].

В основі тензорезистивного ефекту лежить зміна опору тензорезистора, що визначається зміною рухливостей носіїв зарядів у напівпровіднику під дією тиску. Провідність такого напівпровідника прямопропорційна ефективній рухливості носіїв зарядів та їхній концентрації:

$$\sigma = qn\mu_{еф}, \tag{1}$$

де q – заряд електрона, n – концентрація вільних носіїв зарядів та $\mu_{еф}$ – їхня ефективна рухливість.

Вплив температури, що проявляється в зміні концентрації неосновних носіїв зарядів, можна зменшити за рахунок збільшення частки домішкових носіїв.

Звичайно сенсор тиску на основі тензорезисторів виготовляють з кремнієвої пластини, частину якої витравлюють до утворення тонкої мембрани. Методом іонної імплантації на мембрані виконують резистивні елементи з міжз'єднаннями, що утворюють тензочутливий міст з чотирьох тензорезисторів. При зміні тиску мембрана прогинається, і під дією тензорезистивного ефекту відбувається зміна опорів тензорезисторів. В результаті досягається висока чутливість вимірювального моста. Товщина мембрани і геометрична форма резисторів визначається областю необхідних тисків. Спрощений зовнішній вигляд сенсора показаний на рисунку 1 [4].

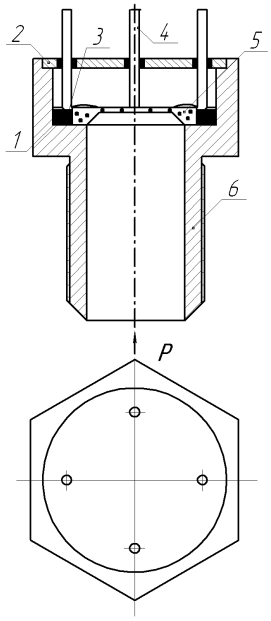

Рис. 1. Конструкція сенсора тиску: 1 – перехідне кільце; 2 – кришка; 3 – проміжні провідники; 4 – вивідні проводи; 5 – напівпровідниковий чутливий елемент; 6 – корпус

На рисунку 2 зображена електрична схема кремнієвого сенсора тиску на основі чотирьох однотипних тензорезисторів, що утворюють тензочутливий міст [1]. При цьому резистори (*R1*…*R4*) з'єднані так, що при прогині мембрани опір резисторів *R1* і *R3* збільшується, а у *R2* і *R4* – зменшується. В результаті досягається висока чутливість вимірювального моста. Вихідна напруга U_a відповідає рівнянню:

$$U_a = U_{cc}\frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)}. \qquad (2)$$

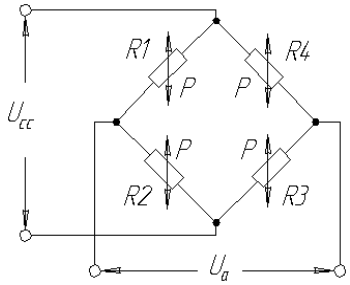

Рис. 2. Вимірювальний міст із чотирьох тензорезисторів

Переваги цих сенсорів такі: висока чутливість, лінійність, малий час спрацьовування, економічна технологія виготовлення, малі габарити, стабільність у роботі й простота експлуатації. Недолік, що полягає в температурній чутливості, в більшості випадків можна скомпенсувати [1].

2. Тензодіоди

Розглянемо фізичний механізм дії тиску на напівпровідникову структуру. Відомо [2], що тиск призводить до зміни відстаней між атомами. Це викликає зсув енергетичних рівнів біля дна зони провідності та вершини валентної зони. Як наслідок, відбувається перерозподіл носіїв заряду між енергетичними рівнями, що впливає на їхню рухливість, а також на ширину забороненої зони.

Розглянемо роботу різкого $p–n^+$-переходу за відсутності тиску. Струм насичення переходу

буде визначатися рухом неосновних носіїв зарядів. Оскільки перехід несиметричний ($n_p >> p_n$), струмом, що утворює дірки в n-області, можна знехтувати. Тоді:

$$j_{нас0} = \frac{q n_{p0} L_{n0}}{\tau_n}, \tag{3}$$

де n_{p0}, L_{n0} – відповідно концентрація електронів у p-області та їхня дифузійна довжина за відсутності тиску, τ_n – їхній час життя (вважатимемо, що тиск не впливає на час життя носіїв зарядів).

Враховуючи, що:

$$L_{n0} = \sqrt{D_{n0}\tau_n},$$

$$D_{n0} = \frac{kT}{q}\mu_{n0},$$

$$\mu_{n0} = \frac{q\tau_n}{m^*_{n0}},$$

$$n_{p0} = N_{c0}\exp\left(-\frac{E_{c0}-E_F}{kT}\right) = 2\left(\frac{2\pi kT m^*_{n0}}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}\exp\left(-\frac{E_{c0}-E_F}{kT}\right),$$

запишемо струм насичення у вигляді:

$$j_{нас0} = \frac{2q(kT)^2 m^*_{n0}}{\left(\frac{h^2}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}}\exp\left(\frac{E_{c0}-E_F}{kT}\right)},$$

або

$$j_{нас0} = \frac{2(qkT)^2 \tau_n}{\left(\frac{h^2}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}}\mu_{n0}\exp\left(\frac{E_{c0}-E_F}{kT}\right)}, \tag{4}$$

де μ_{n0} – ефективна рухливість електронів у p-області та E_{c0} – енергія дна зони провідності за відсутності тиску.

Визначимо струм насичення p–n$^+$-переходу при дії на нього тиску. За умови, що тиск викликає зміни μ_n та E_c p–n$^+$-переходу, перепишемо (4) з урахуванням дії тиску:

$$j_{нас} = \frac{2(qkT)^2 \tau_n}{\left(\frac{h^2}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}}\mu_n\exp\left(\frac{E_c-E_F}{kT}\right)}, \tag{5}$$

де $\mu_n = \mu_{n0} + \Delta\mu_n$, $E_c = E_{c0} + \Delta E_c$, або:

$$j_{нас} = j_{нас0}\frac{\mu_{n0}\cdot\exp(\Delta E_{c0}/kT)}{\mu_n\cdot\exp(\Delta E_c/kT)}. \tag{6}$$

З (6) видно, струм насичення p–n$^+$-переходу $j_{нас}$ зменшується з позитивними змінами ефективної рухливості електронів μ_n та енергії дна зони провідності E_{c0} і навпаки. Аналогічно можна визначити струм насичення p$^+$–n-переходу.

Отже, для досягнення максимальної тензочутливості різкого p–n^+-переходу потрібно, щоб ефективна рухливість електронів у p-області та енергія дна зони провідності змінювались узгоджено під дією тиску.

3. Тензотранзистори

Перевагою чутливих елементів на основі транзисторів є високий рівень вихідного сигналу в порівнянні з тензодіодами і тензорезисторами.

Вплив тиску на характеристики біполярного транзистора можна визначити, розглянувши дію тиску на емітерний та колекторний p–n-переходи, а також на коефіцієнти передачі струмів [2].

Під час роботи біполярного p–n–p-транзистора по схемі із загальною базою коефіцієнт передачі струму визначається [2]:

$$h_{21Б} = 1 - 0,5(q/kT)\cdot(W^2/\mu_p\tau_p), \tag{7}$$

за умови, що $\gamma\cdot\gamma_K = 1$, де W – ширина бази транзистора, γ – ефективність емітера, γ_K – ефективність колектора.

Оцінимо чутливість коефіцієнта передачі струму $h_{21Б}$ відносно рухливості дірок μ_p, використовуючи (7):

$$S_{\mu_p}^{h_{21Б}} = \frac{\partial h_{21Б}}{\partial \mu_p} = 0,5(q/kT)\cdot(W^2/\mu_p^2\tau_p), \tag{8}$$

за умови, що: $$0 < 0,5(q/kT)\cdot(W^2/\mu_p\tau_p) < 1,$$

або $$0 < 0,5(q/kT)\cdot(W^2/\tau_p) < \mu_p. \tag{9}$$

Збільшення чутливості можна досягнути, збільшуючи ширину бази транзистора з одночасним зменшенням рухливості дірок.

При роботі біполярного транзистора по схемі із загальним емітером коефіцієнт передачі струму визначається [2]:

$$h_{21E} = \frac{2kT\tau_p}{qW^2}\cdot\mu_p. \tag{10}$$

Чутливість коефіцієнта передачі струму h_{21E} відносно рухливості дірок дорівнюватиме:

$$S_{\mu_p}^{h_{21E}} = \frac{\partial h_{21E}}{\partial \mu_p} = \frac{2kT\tau_p}{qW^2}. \tag{11}$$

Як бачимо, у виразі (11) відсутній коефіцієнт рухливості дірок. Отже, в біполярному транзисторі, підключеному по схемі із загальним емітером, величина чутливості $S_{\mu_p}^{h_{21E}}$ не залежить від дії тиску, а визначається лише конструктивними параметрами транзистора, завдяки чому можна досягнути значної чутливості відносно тиску.

Польові транзистори мають нижчий рівень енергоспоживання, у порівнянні з біполярними транзисторами, а також вони менш чутливі до змін температур. Для МДН-транзистора з індукованим каналом струм стоку визначається [2]:

$$I_C = \frac{\mu_n C}{l^2}\cdot\left(U_З - \frac{1}{2}U_C\right)\cdot U_C, \tag{12}$$

де C – ємність затвора, l – довжина каналу транзистора, $U_З$ і U_C – напруга затвора і стоку відповідно.

З (12) видно, що зміна μ_n призводить до прямопропорційної зміни струму стоку.

4. Напівпровідникові сенсори тиску з частотним виходом

Досить перспективним є використання сенсорів тиску з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним опором. При цьому генерація вимірюваного частотного сигналу пов'язана з величиною прикладеного до тензочутливого елементу тиску. В якості тензочутливих елементів можуть виступати тензорезистори, тензодіоди і тензотранзистори, причому тензотранзистори можуть бути одночасно і складовою транзисторної структури з від'ємним опором. Зміна електричних параметрів тензочутливого елемента призводить до змін повного опору транзисторної структури, реактивна складова якого носить ємнісний характер. При під'єднанні паралельно транзисторній структурі індуктивності утворюється коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором транзисторної структури. Таким чином, зміна тиску призводить до зміни резонансної частоти контуру, що подається на вихід сенсора.

На рисунку 3 представлено електричну схему сенсора тиску з частотним виходом [3]. В якості тензочутливого елемента виступає біполярний транзистор VT1. Зміна тиску призводить до зміни реактивної складової повного опору, що існує на колекторі біполярного та стоці польового транзисторів, і відповідної зміни частоти на виході.

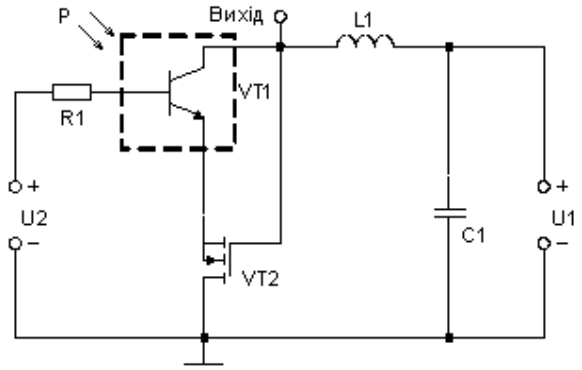

Рис. 3. Електрична схема сенсора тиску з біполярним та польовим транзисторами

Перевага використання частотного інформативного сигналу мікроелектронного сенсора над його аналоговою формою у вигляді напруги або струму зумовлена простотою та точністю перетворення частоти в цифровий код, його високою завадостійкістю під час передачі та ефективністю комутації в багатоканальних вимірювальних системах.

Висновки

Перевагами чутливих елементів на основі транзисторів є високий рівень вихідного сигналу, а також висока тензочутливість, що визначається конструктивними параметрами транзисторів. Використання сенсорів тиску з вихідним частотним сигналом зумовлене їхньою високою завадостійкістю, простотою й точністю перетворення частотного сигналу в цифровий код.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виглеб Т. Датчики. − М.: Мир, 1989. − 196 с.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. − М.: Радио и связь, 1990. − 264 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Сенсори тиску і магнітного поля. − Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. − 207 с.
4. Егизарян Э.Л. Проектирование микродатчиков давления // Микроэлектроника. − 1981. − №6. С. 20 − 22.

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри електроніки;
Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри радіотехніки;
Кривошея Андрій Олександрович — аспірант кафедри електроніки.
Вінницький національний технічний університет