УДК 681.586.2

П'ЄЗОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ У НАПІВПРОВІДНИКАХ ТА ЙОГО ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ

Горбачук М.Т., доц., Попович В.Є., студ.
Київський національний університет технологій та дизайну

PIEZORESISTIVE EFFECT IN SEMICONDUCTORS AND ITS PRACTICAL USE

Gorbachuk M.T., Assoc., Popovych V.E., stud.
Kyiv National University of Technologies and Design

Використовуючи методи математичного аналізу розглянута фізика п'єзорезистивного ефекту в електротехнічних матеріалах. Основна увага приділена напівпровідникам типу кремнію Si в об'ємному вигляді та в вигляді тонких і нанорозмірних плівок кремнію на ізолюючих підкладках. Розглянуто практичне використання ефекту для створення вимірювальних перетворювачів механічних деформацій – тензодатчиків. Наведено приклад конструкції датчиків та основні їх характеристики і можливості. Проаналізовано переваги напівпровідникових тензодатчиків і недоліки, запропоновано шляхи покращення характеристик.

Ключові слова: *Напівпровідники, п'єзорезистивний ефект, тензодатчик, кремній, деформація, плівки*

Using the methods of mathematical analysis, the physics of the piezoresistive effect in electrical engineering materials is considered. The main focus is on silicon Si-type semiconductors in bulk form and in the form of thin and nanoscale silicon films on insulating substrates. The practical use of the effect for the creation of measuring transducers of mechanical deformations - strain gauges - is considered. An example of the construction of sensors and their main characteristics and capabilities is given. The advantages and disadvantages of semiconductor strain gauges are analyzed, ways of improving the characteristics are proposed.

Key words: *Semiconductors, piezoresistive effect, strain gauge, silicon, deformation, films*

Вступ. Відомо, що електрофізичні властивості напівпровідників у 10-100 разів чутливіші до механічних впливів, ніж властивості металів. У той самий час широкому практичному використанню напівпровідникових матеріалів в тензометрії перешкоджає ряд причин. Основними є температурна залежність електрофізичних параметрів таких тензодатчиків (вимірювальних перетворювачів), невисока механічна міцність і жорсткість, що призводить до повзучості показань, значна поперечна тензочутливість.

Розвиток науки і техніки неможливий без удосконалення засобів контролю різних фізичних параметрів. Це відноситься і до тензометрії, необхідність проведення якої зараз виникає в таких умовах, як кріогенні температури, сильні магнітні поля, радіаційні впливи та ін. [1-8].

Метою роботи є математичний аналіз п'єзорезистивного ефекту в напівпровідниках, пошук шляхів мінімізації зазначених вище недоліків напівпровідникових тензодатчиків та зменшення їх впливу на точність виміру. Здійснено спробу оптимізації електрофізичних властивостей та конструкції вимірювальних перетворювачів, а також технології вимірювання.

Теоретичний аналіз. П'єзорезистивний ефект - це зміна електричного опору матеріалу при механічному впливі на нього. Відомо, що зміна електричного опору в цьому випадку відбувається з двох причин – за рахунок зміни геометричних розмірів та за рахунок зміни рухливості носіїв заряду та відповідно провідності матеріалу. Перша причина відноситься до металів, де рухливість носіїв струму при механічному впливі практично не змінюється, а опір змінюється завдяки зміні розмірів при деформації – рис.1.

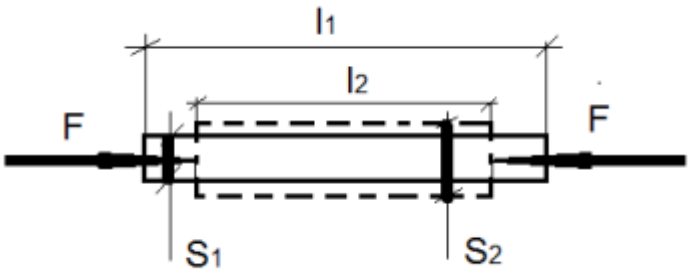


Рис.1 Зміна розмірив l- довжини, S – площі поперечного перерізу зразка при механічному впливі на його силою F.

Електричний опір R матеріалу визначається виразом:

$$R = \rho l/S, \quad (1)$$

де ρ – питомий опір, l – довжина зразка, S – площа поперечного перерізу.

Як можна зрозуміти з рис.1 і виразу (1) при стисканні електричний опір зразка буде зменшуватися за рахунок зменшення довжини $\Delta l = l_1 - l_2$ і зростання площі поперечного перерізу $\Delta S = S_2 - S_1$, а при розтягуванні збільшуватися.

У напівпровідниках з кубічною решіткою для загального випадку, коли напрямок механічної напруги σ і густини струму j становлять довільний кут, п'єзорезистивний ефект теоретично описується за допомогою п'єзорезистивних π_{ij} ($\pi = \Delta\rho/\rho_o X$, де Δρ – зміна питомого опору, ρ_o – початковий питомий опір, X – механічна напруга) або еласторезистивних m_{ij} коефіцієнтів, які є тензорами четвертого рангу [9-11]. Ці коефіцієнти пов'язані між собою через коефіцієнти податливості та модулі пружності. Для кристалів того класу симетрії, до якого належить кремній, у системі кристалографічних осей для опису п'єзорезистивного ефекту достатньо знати три коефіцієнти: π_{11}, π_{12} та π_{44}, які іноді називають головними п'єзорезистивними коефіцієнтами. Головні

пьезорезистивные коефіцієнти залежить від багатьох чинників: від матеріалу, типу провідності, питомого опору, рівня легування, температури, величини механічної деформації (напруги).

В літературі [12,13], наприклад, наведені відомі різні комбінації коефіцієнтів п'єзоопору для напрямків механічних напруг і щільності струму, що збігаються з певними кристалографічними вісями. Усі три основних коефіцієнти пьезоопору можуть бути визначені шляхом трьох вимірів у різних напрямках. Повний тензор п'єзоопору π_{ijkl} визначається таким чином:

$$\Delta\rho_{ij} \Big/ \rho_0 = \sum_{kl}^{3} \pi_{ijkl}\sigma_{kl} \qquad (2)$$

де σ_{kl} – тензор напруги, $\Delta\rho_{ij}$ – тензор питомого опору. Відомо, що тензор напруги є симетричним тензором і має шість незалежних компонентів. Те саме справедливо і для тензора питомого опору.

З урахуванням сказаного у шестивимірному просторі можна отримати:

$$\Delta\rho_i \Big/ \rho_0 = \sum_{j=1}^{6} \pi_{ij}\sigma_j, i = 1,2,...6 \qquad (3)$$

Для об'ємного n-Si з рівномірним легуванням і ρ = 11,7 Ом•см у роботі [13] наведено: π_{11} = –102,2•10^{-11} $м^2$/Н, π_{12} = 53,7•10^{-11} $м^2$/ Н , π_{44} = -13,6 • 10^{-11} $м^2$/ Н, а для p-Si з ρ = 7,8 Ом·см π_{11} = 6,6·10^{-11} $м^2$/ Н, π_{12} = -1,1·10^{-11} $м^2$/ Н, π_{44} = 138,1·10^{-11} $м^2$/ Н.

У шарах кремнію з дифузійним легуванням пьезорезистивные коефіцієнти визначаються концентрацією домішки на поверхні шару N_n [14] і майже не залежить від закону розподілу домішки. З отриманих у цій роботі результатів видно, що для шарів n-Si коефіцієнт π_{11} при кімнатній температурі змінюється від 17•10^{-11} $м^2$/Н (N_n =1•10^{21} $см^{-3}$) до 88•10^{-11} $м^2$/Н (N_n = 1,8•10^{18} $см^{-3}$). Помітна температурна залежність π_{11} починається з N_n = 9•10^{19} $см^{-3}$ (приблизно 0,1 %/К).

У зв'язку з особливостями зонної структури n-Si для слаболегованого кремнію справедливі припущення [13]:

$$\pi_{44} \approx 0;\ \pi_{11} \approx -2\,\pi_{12}\ .$$

У міру збільшення концентрації домішки виникає порушення цих припущень, що необхідно мати на увазі при аналізі характеристик тензоефектів. Для дифузійних шарів порушення відбуваються за $N_n \geq 5\times10^{19}$ $см^{-3}$ [9, 14].

Залежно від кристалографічної орієнтації зразка кремнію виходять різні комбінації величин поздовжніх та поперечних коефіцієнтів п'єзоопору. Це важливо враховувати при розробці конструкції тензодатчиків і особливо таких, чутливий елемент яких працюватиме в умовах одновісної деформації і складові

чутливого елемента будуть орієнтовані як поздовжньому, так і поперечному напрямках. Використовуючи дані /[12] можна порахувати, що для слаболегованого p-Si оптимальними співвідношеннями поздовжніх і поперечних орієнтацій є 110 ⊥ 110, а для n-Si 100 ⊥ 010. Для зразків слаболегованого p-Si з поздовжньою орієнтацією <110>, наприклад, можна отримати $\pi_{II} \approx 72 \cdot 10^{-11}$ м^2/Н, а $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11}$ м^2/Н (π_{II} – поздовжній коефіцієнт п'єзоопору, $\pi_{\perp}$ – поперечний коефіцієнт п'єзоопору).

Аналізуючи відомі в літературі дані можна спостерігати, що і для p-Si в сильнолегованому матеріалі порушуються співвідношення, справедливі для чистого р-кремнію. При цьому тензочутливість для певних напрямків може зростати в порівнянні з чистим кремнієм, що можна пояснити зростанням вкладу важких дірок [9,12,13].

Експериментальна частина. Для дослідження та створення вимірювальних перетворювачів використані леговані іонною імплантацією фосфору та бору тонкі і нанорозмірні полікристалічні плівки кремнію на площині (100) монокристалічного кремнію з ізолюючим шаром SiO_2. Такі структури можуть бути більш технологічними при використанні планарних методів виготовлення вимірювальних перетворювачів.

Використані плівки полікремнію n та р-типу провідності, товщиною 0.6 мкм та рівнями легування ($1 \cdot 10^{17} – 5 \cdot 10^{19}$) см $^{-3}$. В основному в експерименті використовувалися зразки з плівками р-типу поздовжньої орієнтації <100>, а поперечної <010>, так як для сильнолегованого полікристалічного р-кремнію поперечний і поздовжній коефіцієнти для цієї орієнтації, як показано, близькі за величиною. Легуючою домішкою для р-кремнію служив бор.

Для певних розмірів датчика механізм передачі деформації призводить до того, що як показано в [15] при співвідношенні ширини датчика d до висоти h d/h < 2 поперечна деформація об'єкта практично не передається на його поверхню. Ця властивість використана нами для виготовлення експериментальних тензодатчиків (вимірювальних перетворювачів).

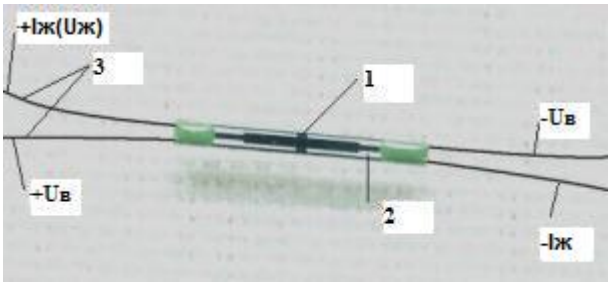


Рис. 2. Датчик деформації. 1-тензочутлива мікросхема; 2 – підкладка; 3 – електричні виводи; $I_ж(U_ж)$ – струм чи напруга живлення, $U_в$ – вихідна напруга.

На рис.2 показано зображення одного з типів перетворювачів деформації (напруження) і полярність підключення живлення та вимірювальних приладів. Він складається з інтегрального чутливого елемента 1, виконаного на основі плівки кремнію, осадженої на підкладку 2 монокристалічного кремнію з шаром оксиду на поверхні. Електричні виводи 3 виготовлені з алюмінієвого дроту d=80 мкм, кінці яких забезпечені смужками металу, що піддається пайці звичайним припоєм. Конструкція та інтегральне виконання чутливого елемента датчика забезпечують термокомпенсацію основних параметрів, компенсацію впливу магнітного поля та відсутність поперечної тензочутливості. Розмір бази датчика 8мм, вхідний $R_{вх}$ і вихідний $R_{вих}$ електричні опори залежать від рівня легування і товщини плівок і знаходяться в межах (200 – 3000) Ом, струм живлення залежить від величини опору і, як правило, знаходиться в межах (1 – 10) мА.

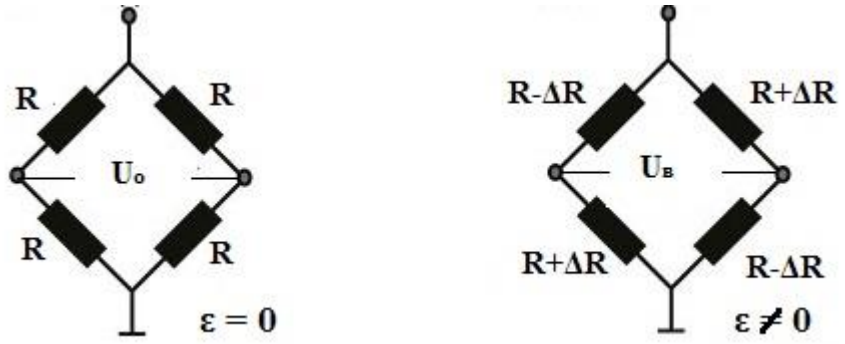


Рис. 3. Принципова електрична схема чутливого елемента тензодатчика

Принцип роботи тензодатчика полягає у зміні електричного опору резистивних елементів інтегральної мікросхеми при прикладанні механічної деформації вздовж осі датчика (рис. 3), розкомпенсації мікросхеми та появі, в результаті цього електричної напруги $U_в$ на вимірювальних контактах при живленні датчика струмом або напругою (див. рис.2,3). Попередньо проградуювавши датчик тобто. отримавши залежність вихідної напруги $U_в$ від величини механічної деформації в подальшому за величиною вихідної напруги датчика, жорстко закріпленого на об'єкті, визначають деформацію об'єкта.

$$\varepsilon = (U_в - U_o)/k \qquad (5)$$

де $U_в$ – вихідний сигнал датчика після появи деформації ε об'єкта, що досліджується, U_o – початковий вихідний сигнал, який вимірюється після монтажу датчика на об'єкт, $k = \Delta U_в / \Delta\varepsilon$ – тензочутливість датчика.

Для монтажу датчика на об'єкт дослідження можуть бути використані клеї БФ-2, ВС-350 та інші, що широко застосовуються в тензометрії та забезпечують достатню жорсткість монтажу. Допустимість використання даного сполучного матеріалу може бути перевірена за величиною повзучості

показань датчика після навантаження перевірочної балки, яка не повинна перевищувати допустиму похибку вимірювань.

Наведемо для прикладу деякі результати дослідження вимірювальних перетворювачів з $R_{вх}$ =1.7 кОм (N_p =10^{18} $см^{-3}$). Тензочутливість при струмі живлення 2 мА становить приблизно 42 мкВ/$млн^{-1}$. Величина нульового (початкового) вихідного сигналу датчика U_o ~ 6.2 мВ і при необхідності може бути підігнана близькою до нуля. Температурна залежність тензочутливості трохи більше 0,02 % /К, U_o ~ 8 мкВ/К, R ~0.03 % /К. Характеристики можна змінювати, наприклад, збільшуючи струм живлення (не допускаючи перегріву та неприпустимих шумів), збільшити чутливість.

Відомо, що точність вимірювань значною мірою залежить від такого параметра, як повзучість показань. Повзучість визначається жорсткістю конструкції датчика та сполучного і обумовлена пластичною деформацією сполучного (клею) під дією механічної деформації. Як правило, для напівпровідникових датчиків повзучість істотно вища за повзучість фольгових металевих.

На наш погляд, для розглянутих датчиків повзучість є головним недоліком і обумовлена досить жорсткою конструкцією перетворювача. Шляхами зменшення повзучості можуть бути подальша мініатюризація та оптимізація форми датчика, підбір сполучного.

Висновок. У роботі проаналізовано пьєзоефект у металах та більш детально у напівпровідниках типу кремнію, розглянуто теоретичні принципи роботи напівпровідникових тензодатчиків. Запропоновано варіанти удосконалення вимірювальних перетворювачів, виготовлено експериментальні зразки вимірювальних перетворювачів деформації на основі плівок кремнію на кремнієвих підкладках та досліджено їх характеристики. Перевагами запропонованих конструкцій та технологій вимірювання є висока тензочутливість, простота перетворення вимірюваного параметра електричний сигнал, температурна компенсація вихідних параметрів перетворювачів.

Список використаних джерел:

1. Клокова Н.П. Тензорезисторы. Датчики и системы. 2004, №3, с.10-12.

2. Гридчин В.М., Любимский. Пьезосопротивление в пленках поликристаллического кремния р-типа. ФТП, 2004, т.38, в.8.

3. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. Sensors & Transducers Journal and Magazine, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4

4. Горбачук Н.Т., Диденко П.И. Исследование некоторых электрофизических свойств пленок n-Si, легированных ионной имплантацией. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2006, №4, с.104-106

5. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Кубраков А.П., Павловский И.В. Тензорезисторы для низких температур на основе нитевидных кристаллов кремния. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008, №4, с. 26-30.

6. Беляков В.А., Горбачук Н.Т., Ламзин Е.А., и др. Полупроводниковые измерительные преобразователи деформации, температуры и магнитного поля для применения в условиях радиационного воздействия, широком диапазоне температур и магнитных полей. «Вопросы атомной науки и техники», Серия: Электрофизическая аппаратура, в.3(29), 2005, с.46-54.

7. Клокова Н.П. Тензорезисторы.-М.Машиностроение, 1990.-224с.

8. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. Справочник. М. Машиностроение, 1989.-240с.

9. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. –М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

10. Терстон Р. Применение полупроводниковых преобразователей для измерения деформаций, ускорений и смещений. –В кн.: Физическая акустика/ Под ред. У. Мэзона, т.1, часть Б –Методы и приборы ультразвуковых исследований. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967, с.187–209.

11 Горбачук М.Т.. Електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. LAP LAMBERT Academic Publishing. 17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius, 2017. ISBN: 978-620-2-05432-4, 110 с.

12. Зеегер К. Физика полупроводников. Пер. с англ. под ред. Ю.К. Пожелы. – М.: Мир, 1977, с. 615.

13. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. - Phys. Rev. 1954, v. 94, 1, p. 42-49.

14. Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused lauers. – J. Appl. Phys., 1963, v. 34, 9, p. 313–318.

15. Патент РФ 2043671. Полупроводниковый тензорезистор. Авт. Горбачук Н.Т. / Б.И. 1995, №25.