

КАПИТЕЛ 6 / CHAPTER 6⁶

RESEARCH OF PIEZORESISTIVE EFFECT IN SILICON FILMS AND DEVELOPMENT OF MEASURING TRANSDUCERS BASED ON THEM

DOI: 10.30890/2709-2313.2023-23-01-017

Вступ

Розвиток науки, техніки, технологій вимагає вдосконалення і засобів контролю різних параметрів фізичних процесів. Це стосується також тензометрії, необхідність проведення якої зараз виникає в таких умовах, як криогенні температури, сильні магнітні поля, радіаційні впливи тощо. Тому постійно ведуться роботи з вивчення фізики тензоефекту в різних матеріалах, розроблення методик вимірювання механічних деформацій і конструкцій вимірювальних засобів [1-9]. Досить багато досліджень присвячено напівпровідниковим матеріалам. Наприклад, в роботах [3-7] зроблена спроба удосконалення технологій вимірювання та тензодатчиків на основі плівок кремнію.

Теоретичний аналіз

Для загального випадку, коли напрямок механічного напруження σ і густини струму j становлять довільний кут, п'єзорезистивний ефект у напівпровідниках із кубічною решіткою теоретично описується за допомогою п'єзорезистивних π_{ij} ($\pi = \Delta\rho/\rho_0 X$, де $\Delta\rho$ - зміна питомого опору, ρ_0 - початковий питомий опір, X - механічні напруження) або еласторезистивних m_{ij} коефіцієнтів, які є тензорами четвертого рангу [10, 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} і π_{44} , які іноді називають головними п'єзорезистивними коефіцієнтами. Головні п'єзорезистивні коефіцієнти залежать від багатьох факторів: від матеріалу, типу провідності, питомого опору, рівня легування, температури, величини механічної деформації (напруги).

У [12,13], наприклад, наведені відомі різні комбінації коефіцієнтів п'єзоопору для напрямів механічних напружень і густини струму, які збігаються

⁶Authors: Gorbachuk Mykola Tykhonovich



з певними кристалографічними осями. Усі три головні коефіцієнти п'єзоопору можуть бути визначені шляхом трьох вимірювань у різних напрямках. Повний тензор п'єзоопору π_{ijk_1} визначається таким чином:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl}^3 \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

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

З урахуванням сказаного в шестивимірному просторі можна отримати:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \sigma_j, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

Для об'ємного n-Si з рівномірним легуванням і $\rho = 11,7$ Ом-см у роботі [13] наведено: $\pi_{11} = -102,2 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, $\pi_{12} = 53,7 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, $\pi_{44} = -13,6 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, а для p-Si з $\rho = 7,8$ Ом-см $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, $\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н.

У шарах кремнію з дифузійним легуванням п'єзорезистивні коефіцієнти визначаються концентрацією домішки на поверхні шару N_d [14] і практично не залежать від закону розподілу домішки. З отриманих у цій же роботі результатів видно, що для шарів n-Si коефіцієнт π_{11} при кімнатній температурі змінюється від $17 \cdot 10^{-11}$ м²/Н ($N_d = 1 \cdot 10^{21}$ см⁻³) до $88 \cdot 10^{-11}$ м²/Н ($N_d = 1,8 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Помітна температурна залежність π_{11} починається з $N_d = 9 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (приблизно 0,1 %/К).

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

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

Зі збільшенням концентрації домішки виникає порушення цих припущень, що необхідно мати на увазі при аналізі характеристик тензоефектів. Для дифузійних шарів порушення відбуваються при $N_n \geq 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ /10, 13/.

Залежно від кристалографічної орієнтації зразка кремнію виходять різні комбінації величин поздовжніх і поперечних коефіцієнтів п'єзоопору. Це важливо враховувати під час розроблення конструкції тензодатчиків і особливо таких, чутливий елемент яких працюватиме в умовах одновісної деформації і складові чутливого елемента будуть орієнтовані як у поздовжньому, так і поперечному напрямках. Використовуючи дані [12] можна порахувати, що для слабологованого p-Si оптимальними співвідношеннями поздовжніх і поперечних орієнтацій є $110 \perp 110$, а для n-Si $100 \perp 010$. Для зразків слабологованого p-Si з поздовжньою орієнтацією $\langle 110 \rangle$, наприклад, можна отримати $\pi_{II} \approx 72 \cdot 10^{-11}$ м²/Н,



а $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ (π_{\parallel} - поздовжній коефіцієнт п'єзоопору, π_{\perp} - поперечний коефіцієнт п'єзоопору).

Аналізуючи відомі в літературі дані можна спостерігати, що і для р-Si в сильнолегованому матеріалі порушуються співвідношення, справедливі для чистого р-кремнію. При цьому тензочутливість для певних напрямків може зростати порівняно з чистим кремнієм, що можна пояснити зростанням внеску важких дірок [10,12,13].

Відомі й низка інших чинників, що помітно визначають характеристики тензодатчика. Наприклад, суттєвим є вплив на параметри тензодатчика його геометричних розмірів. У роботі [8] показано, що не вся деформація передається від досліджуваного деформованого об'єкта до чутливого елемента тензодатчика навіть за найжорсткішого сполучного. Деформація, що передається, залежить від розмірів тензодатчика, його пружних властивостей і властивостей сполучного, за допомогою якого датчик кріпиться до балки. Облік зазначеного ефекту може бути зроблений за допомогою коефіцієнта передачі, величина якого (для випадку, коли тензочутливий елемент розташований у центрі зразка) може бути визначена за формулою [8]:

$$k_{пер} = 1 - \frac{2}{bl} \left(1 - e^{-bl/2} \right) \quad (3)$$

де $b = \sqrt{GC/EQ}$, G - модуль зсуву сполучного, E - модуль пружності

чутливого елемента (зразка), Q - площа поперечного перерізу зразка, $C = \frac{2\pi}{\ln 4h_c/h}$, h - товщина зразка, h_c - товщина сполучного, l - довжина зразка.

Експериментальні результати

Для дослідження і створення вимірювальних перетворювачів використано леговані іонною імплантацією фосфору і бору тонкі полікристалічні плівки кремнію на площині (100) монокристалічного кремнію з ізолювальним шаром SiO₂. Такі структури можуть бути більш технологічні при використанні планарних технологій виготовлення вимірювальних перетворювачів.

Експериментально виміряно питомий опір ρ , коефіцієнти поздовжньої $k_{\parallel} = \Delta\rho_{\parallel}/\rho_{\parallel}\cdot\varepsilon_{\parallel}$ (де $\Delta\rho_{\parallel}$ - зміна питомого опору вздовж напрямку деформації ε_{\parallel}), і поперечної $k_{\perp} = \Delta\rho_{\perp}/\rho_{\perp}\cdot\varepsilon_{\parallel}$ (де $\Delta\rho_{\perp}$ - зміна питомого опору перпендикулярно до напрямку деформації ε_{\parallel}) тензочутливості, коефіцієнти п'єзоопору $\pi_{\parallel} = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$ і $\pi_{\perp} = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$, температурна і деформаційна залежності параметрів



експериментальних перетворювачів.

Вимірювання коефіцієнтів п'єзоопору проводили як за допомогою консольної сталевий балки рівного опору вигину, на яку клеєм БФ-2 приклеювали зразок, так і шляхом безпосереднього навантаження зразків. Порівнюючи отримані результати можна поррахувати величину коефіцієнту передачі деформації та оцінити наскільки він збігається з розрахунком теоретично за формулою (3). Плівки використані n-типу на площині (100) кремнію. Товщина плівок 0,6 мкм, концентрація легуючої домішки фосфору $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Питомий опір 0,013 Ом см. Вимірювання проведено на зразках (тензодатчиках) розмірами $8 \times 0,6 \times 0,4 \text{ мм}$ із плівкою на поверхні (рис. 1).

Під час вимірювань за допомогою балки та використання величини деформації, розрахованої за відомою формулою $\varepsilon_6 = h\delta/l_6^2$ (де h - товщина балки, l_6 - довжина балки, δ - переміщення вільного кінця балки), було отримано значення коефіцієнтів тензочутливості $\sigma_{k_{\parallel}}$ ($\varepsilon_{\parallel} \langle 110 \rangle$; $J_{\parallel} \langle 110 \rangle$) і $\sigma_{k_{\perp}}$ ($\varepsilon_{\perp} \langle 110 \rangle$; $J_{\perp} \langle 110 \rangle$) -27,3 і -2,8 відповідно.

Під час вимірювання тензочутливості методом прямого навантаження зразок консольно закріплювали, і прикладали згинальне навантаження. Похибка вимірювання коефіцієнтів цим методом не перевищувала 4%. За кімнатної температури отримано такі значення: $\pi_{\parallel} = -24,9$ і $\pi_{\perp} = -2,4$. Якщо використати відомі коефіцієнти пружності для кремнію і поррахувати k , то отримаємо $k_{\parallel} = -39,1$, $k_{\perp} = -3,8$. Порівнюючи отримаємо експериментальний коефіцієнт передачі $k_{\text{пер}}^e = 0,71$

Для порівняння проведено вимірювання методом прямого навантаження. Підставляючи параметри наших умов вимірювання у формулу (3) (для $h_c = 0,15 \text{ мм}$), отримаємо теоретичний $k_{\text{пер}}^T = 0,68$. Таким чином визначені експериментально і теоретично параметри передачі деформації практично збігаються.

Також встановлено, що в іонно імплантованих плівках p-Si з концентрацією домішки $N_p = (10^{18}-10^{19}) \text{ см}^{-3}$, наприклад, поздовжній та поперечний коефіцієнти тензочутливості k_{\parallel} , k_{\perp} ($k = \Delta\rho/\rho_0\varepsilon$, ε - відносна механічна деформація) для поздовжньої орієнтації $\langle 100 \rangle$ були близькі за величиною та становили величини не менші, ніж $k_{\parallel} \approx k_{\perp} = 30$. Ця властивість може бути використана при конструюванні топології тензосхеми. Ефект може пояснюватися полікристалічністю плівки та особливостями зонної структури p-кремнію, що може визначати тензоефект легкими дірками в слабологованому матеріалі, а в



сильнолегованому їхній внесок зменшується.

Як показано в [15] механізм передавання деформації від об'єкта до датчика призводить до того, що в разі співвідношення ширини d датчика до висоти h $d/h < 2$ поперечна деформація об'єкта практично не передається на його поверхню. Цю властивість використано під час виготовлення експериментальних тензодатчиків (вимірювальних перетворювачів).

Для виготовлення вимірювальних перетворювачів механічної деформації використано плівки полікремнію n - і p -типу провідності, товщиною $0,6$ мкм і рівнями легування $10^{17} - 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В основному в експерименті використовувалися зразки з плівками p -типу поздовжньої орієнтації $\langle 100 \rangle$, а поперечної $\langle 010 \rangle$, оскільки для сильнолегованого полікристалічного p -кремнію поперечний і поздовжній коефіцієнти для цієї орієнтації, як показано вище, близькі за величиною. Легуючою домішкою для p -кремнію слугував бор.

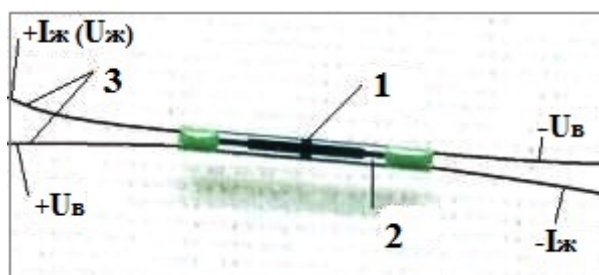


Рис. 1 - Датчик деформації: 1- тензочутлива мікросхема; 2 - підкладка; 3 - електричні виводи; $I_{ж}(U_{ж})$ – струм (напруга живлення), $U_{в}$ - вихідна напруга.

На рис.1 показано зображення одного з типів перетворювачів деформації (механічних напруг) і полярність підключення живлення та вимірювальних приладів. Він складається з інтегрального чутливого елемента 1, виконаного на основі плівки кремнію, нанесеної на підкладку 2 з монокристалічного кремнію з шаром окислу SiO_2 на поверхні. Електричні виводи 3 виготовлені з алюмінієвого дроту $d=80$ мкм, кінці якого забезпечені смужками металу, що піддається пайці звичайним припоєм. Конструкція та інтегральне виконання чутливого елемента датчика забезпечують термокомпенсацію основних параметрів, компенсацію впливу магнітного поля і відсутність поперечної тензочутливості. Розмір бази датчика 8 мм, вхідний $R_{вх}$ і вихідний $R_{вих}$ електричні опори залежать від рівня легування і товщини плівок і перебувають у межах $200-3000$ Ом, струм живлення залежить від величини опору і, зазвичай, перебуває в межах $1-10$ мА. Різниця у



величинах електричного опору датчиків однієї партії не перевищує 5%, а за необхідності партія датчиків може бути сформована з практично ідентичних за технічними характеристиками.

Принцип роботи тензодатчика полягає у зміні електричного опору резистивних елементів інтегральної мікросхеми під час прикладання механічної деформації уздовж осі датчика, розкомпенсації мікросхеми та появи, внаслідок цього, електричної напруги U_B на вимірювальних контактах при живленні датчика струмом або напругою (див. мал.1). Попередньо проградувавши датчик, тобто отримавши залежність вихідної напруги U_B від величини механічної деформації ε , надалі за величиною вихідної напруги датчика, жорстко закріпленого на об'єкті, визначають деформацію об'єкта:

$$\varepsilon = (U_B - U_0)/k \quad (4)$$

де U_B - вихідний сигнал датчика після появи деформації ε досліджуваного об'єкта, U_0 - початковий вихідний сигнал, який вимірюється після монтажу датчика на об'єкт, $k = \Delta U_B / \Delta \varepsilon$ - тензочутливість датчика.

Для монтажу датчика на об'єкт дослідження можуть бути використані широко застосовувані в тензометрії клеї БФ-2, ВС-350 та інші, що забезпечують достатню жорсткість монтажу. Допустимість використання цього сполучного матеріалу може бути перевірена за величиною повзучості показань датчика після навантаження повірочної балки, яка не повинна перевищувати допустимої похибки вимірювань.

Нижче наведено результати докладнішого дослідження вимірювальних перетворювачів з $R_{вх} = 1.7$ кОм ($N_p = 10^{18}$ см⁻³). Тензочутливість при струмі живлення 2 мА приблизно 42 мкВ/млн⁻¹. Величина нульового (початкового) вихідного сигналу датчика $U_0 \sim 6.2$ мВ і за необхідності може бути підігнана близькою до нуля. Температурна залежність тензочутливості не більше 0,02 % /К, $U_0 \sim 8$ мкВ/К, $R \sim 0,03$ % /К. Характеристики можна змінювати, наприклад, збільшуючи струм живлення (не допускаючи перегріву і неприпустимих шумів) збільшити вихідний сигнал.

На рис.2 (а) показано залежності від температури нульового вихідного сигналу U_0 (відносна деформація $\varepsilon=0$) (1), тензочутливості $k = \Delta U_B / \Delta \varepsilon$ (2) і вихідного сигналу датчика U_B , наклеєного на сталеву пластинку (3). Останній відстежує термічні напруги.

На рис.2 (б) показано залежність вихідної напруги U_B від величини прикладеної деформації. Графік свідчить про хорошу лінійність характеристики

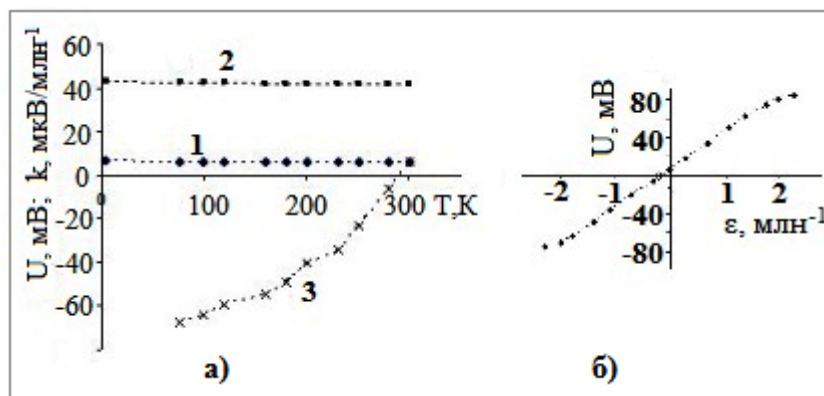


Рис. 2. а) - температурні залежності нульового вихідного сигналу U_0 (відносна деформація $\epsilon=0$) (1), тензочутливості $k = \Delta U_B / \Delta \epsilon$ (2) і вихідного сигналу датчика U_B , наклеєного на сталеву пластинку (3). б) - залежність вихідної напруги U від величини прикладеної деформації ϵ .

до деформацій $1 \cdot 10^{-3}$ млн $^{-1}$. Тензочутливість дослідженого датчика, як видно з графіка, дорівнює 42 мкВ/млн $^{-1}$.

Експериментально спостережувана нелінійність після $\epsilon > 1 \cdot 10^{-3}$ млн $^{-1}$ може бути пов'язана як з електрофізичними властивостями чутливої плівки кремнію, так і з властивостями сполучного.

На наш погляд для розглянутих датчиків головним недоліком може виявитися повзучість показань. Вона зумовлена досить жорсткою конструкцією перетворювача, яка потребує відповідного сполучного для кріплення датчиків на об'єкт. Шляхами зменшення повзучості можуть бути подальша оптимізація конструкції та форми датчика, підбір сполучного.

Висновок

У роботі розглянуто п'єзоефект у напівпровідниках типу кремнію, проаналізовано теоретичні принципи роботи напівпровідникових тензодатчиків. Наведено результати дослідження розроблених і виготовлених експериментальних зразків вимірювальних перетворювачів деформації на основі плівок кремнію на кремнієвих підкладках і проаналізовано їхні характеристики. Запропоновано варіанти вдосконалення вимірювальних перетворювачів. Перевагами запропонованих конструкцій і технологій вимірювання є висока тензочутливість, простота перетворення вимірюваного параметра в електричний сигнал, температурна компенсація вихідних параметрів перетворювачів.