

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 681.586, 537.32

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ СТРУКТУР “КРЕМНІЙ НА ІЗОЛЯТОРІ” З РЕКРИСТАЛІЗОВАНИМ ШАРОМ ПОЛІКРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

НУ “Львівська політехніка”, НДЦ “Кристал”, вул. Котляревського, 1, Львів, 79013
тел. (032) 258-23-97, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ СТРУКТУР “КРЕМНІЙ НА ІЗОЛЯТОРІ” З РЕКРИСТАЛІЗОВАНИМ ШАРОМ ПОЛІКРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

Анотація. Представлено результати досліджень зі створення мікроелектронних сенсорів механічних і теплових величин на основі структур “кремній на ізоляторі” (КНІ-структур) з рекристалізованих лазером шаром полікремнію. Описано розроблену технологію мікрозонної лазерної рекристалізації полі-Si шарів.

На основі проведених досліджень терморезистивних характеристик шарів полі-Si з різною концентрацією носіїв заряду розроблено мікроелектронні сенсори температури для різних температурних діапазонів, а також сенсори криогенних температур, працездатні в сильних магнітних полях.

Проведено дослідження тензорезистивних властивостей шарів полі-Si з різною концентрацією носіїв у широкому інтервалі деформацій і температур. Представлено розроблені мікроелектронні тензорезистивні сенсори тиску різного призначення: високочастотні сенсори для аеродинамічних досліджень, сенсори тиску медичного призначення, а також сенсори для вимірювання тиску і температури. Описано також створений ємнісний мікроелектронний сенсор для вимірювання артеріального тиску.

Ключові слова: полікремній, лазерна рекристалізація, мікроелектронний сенсор, сенсор температури, сенсор тиску

PHYSICAL SENSORS BASED ON SILICON- ON- INSULATOR STRUCTURES WITH RECRYSTALLIZED POLYSILICON LAYER

A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, I. T. Kogut, Yu. M. Khoverko

Abstract. The results of studies concerning the creation of microelectronic mechanical and thermal sensors based on silicon-on-insulator structures (SOI-structures) with laser recrystallized polysilicon layers are presented. The developed technology of microzone laser recrystallization of poly-Si layers is described.

On the basis of investigated thermoresistive characteristics of poly-Si layers with different carrier concentrations microelectronic temperature sensors for different temperature ranges were developed, including sensors of cryogenic temperatures operating at high magnetic fields.

The piezoresistive properties of poly-Si layers with different carrier concentration are studied in the wide temperature and strain ranges. The developed microelectronic piezoresistive pressure sensors for different applications are presented, i.e. high-frequency sensors for aerodynamic studies, medical pressure sensors and sensors to measure pressure and temperature. The created microelectronic capacitive sensor for arterial pressure measurement is described also.

Keywords: polysilicon, laser recrystallization, microelectronic sensor, temperature sensor, pressure sensor

СЕНСОРЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ СТРУКТУР “КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ” С РЕКРИСТАЛЛИЗИРОВАННЫМ СЛОЕМ ПОЛИКРЕМНИЯ

А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, И. Т. Козут, Ю. Н. Ховерко

Аннотация. Представлены результаты исследования по созданию микроэлектронных сенсоров механических и тепловых величин на основе структур “кремний на изолято́ре” (КНИ-структур) с рекристаллизованным лазером слоем поликремния. Описана разработанная технология микроразной лазерной рекристаллизации поли-Si слоёв.

На основе проведенных исследований терморезистивных характеристик поли-Si слоёв с разной концентрацией носителей заряда разработаны микроэлектронные сенсоры температуры для разных температурных диапазонов, а также сенсоры криогенных температур, работоспособные в сильных магнитных полях.

Проведены исследования тензорезистивных свойств слоёв поли-Si с разной концентрацией носителей в широком интервале деформаций и температур. Представлены разработанные микроэлектронные тензорезистивные сенсоры давления различного назначения: высокочастотные сенсоры для аэродинамических исследований, сенсоры давления медицинского назначения, а также сенсоры для измерения давления и температуры. Описан также микроэлектронный емкостной сенсор для измерения артериального давления.

Ключевые слова: поликремний, лазерная рекристаллизация, микроэлектронный сенсор, сенсор температуры, сенсор давления

Вступ

Сучасний розвиток науки і техніки вимагає створення різноманітних сенсорів для вимірювання, контролю та управління процесами, що використовуються у виробництві, екології, медицині, космічній техніці та ін. Поряд з традиційним використанням кремнію в сучасній мікроелектроніці, ведуться інтенсивні наукові пошуки інших матеріалів і структур, зокрема роботи щодо створення мікроелектронних сенсорів на основі структур “кремній на ізоляторі” (КНІ-структур) [1,2]. Створення мікроелектронних сенсорів на основі КНІ-структур з рекристалізованим полікремнієм дає можливість у порівнянні з відомими дифузійними струк-

турами, розширити інтервал робочих температур сенсорів і покращити їх характеристики, а в порівнянні з КНС-структурами, підвищити технологічність процесу виготовлення сенсорів та знизити їх собівартість. Микроразна лазерна рекристалізація активних елементів мікроелектронних сенсорів дає змогу ефективно модифікувати їх електрофізичні властивості, а електрична ізоляція від базової пластини за допомогою шару оксиду кремнію відкриває можливість розширення інтервалу робочих температур приладів на основі КНІ-структур. Цей напрям вважається найбільш перспективним як з технологічної точки зору, так і для розширення функціональних можливостей сенсорів.

Технологія лазерної рекристалізації

Для створення якісних КНІ-структур був використаний метод мікрозонної лазерної рекристалізації шарів полікремнію, за якого, завдяки малому часу існування розплаву, на відміну від поширеного методу зонної плавки [3], відсутній помітний перерозподіл заданого профілю домішки у вихідній КНІ-структурі. Такий метод дозволяє формувати необхідні за розмірами монокристалічні області полікремнію, одночасно забезпечуючи технологічність і простоту процесів лазерної рекристалізації.

Попередня підготовка вихідних зразків полягала у наступному. На пластинах Si з діаметром 100 мм і кристалографічної орієнтації (100) термічно нарощувався оксид кремнію до товщини 1,0 мкм, на який в подальшому з газової фази в реакторі пониженого тиску за температури 625°C осаджувався шар полікремнію товщиною 0,5 мкм. Для контролю за процесами зародження і росту зерен під час мікрозонної рекристалізації на етапі формування КНІ-структур застосовувався спосіб селективного нагрівання матеріалів для створення заданого температурного профілю в зоні термічного впливу випромінювання. Для цього на шар полікремнію додатково осаджувались плівка SiO₂ товщиною 0,75 мкм та створювалися смуги Si₃N₄ шириною 5 мкм з кроком 30 мкм.

Лазерна рекристалізація КНІ-структур проводилась шляхом двонаправленого сканування лазерного променя вздовж поверхні за рахунок прецизійного переміщення столика у двох взаємоперпендикулярних напрямках. Зміщення столика за віссю "У" забезпечувало заданий рівень перекриття сусідніх смуг сканування, а використання системи підігріву дозволяло підтримувати стаціонарний нагрів структури до температур ~600÷650°C. Дослідження впливу режимів лазерної рекристалізації на структурні перетворення в шарах полікремнію проводились з метою визначення умов відпалу, за яких можна отримувати шари полікремнію з достатньо великим розміром зерна і мінімальною кількістю дефектів.

Як показали дослідження, внаслідок лазерної рекристалізації шарів полікремнію, захищених комбінованим капсулюючим покриттям, зерна ростуть в напрямку <100> і досягають середніх розмірів до 20 × 500 мкм [4].

Об'єкт дослідження

Для дослідження властивостей шарів полі-Si були використані тестові зразки з різною концентрацією домішки. Легування полікремнію проводилось методом іонної імплантації бору з дозою (30 ÷ 500) мкКл/см² та енергіями (30 ÷ 60) кеВ. Зразки являли собою КНІ-структури в площині підкладки з монокристалічного кремнію товщиною 500 мкм. На рис. 1а показано варіант топології тестового зразка КНІ-структури. Кожний із зразків типу MET-1 містив 6 полікремнієвих резисторів довжиною 80 мкм і шириною 8 мкм з різними кристалографічними орієнтаціями. Така топологія тестового зразка є універсальною для дослідження тензорезистивного ефекту в полікремнієвих шарах і дозволяє виготовлювати зразки для вимірювання поздовжнього і поперечного тензоопору.

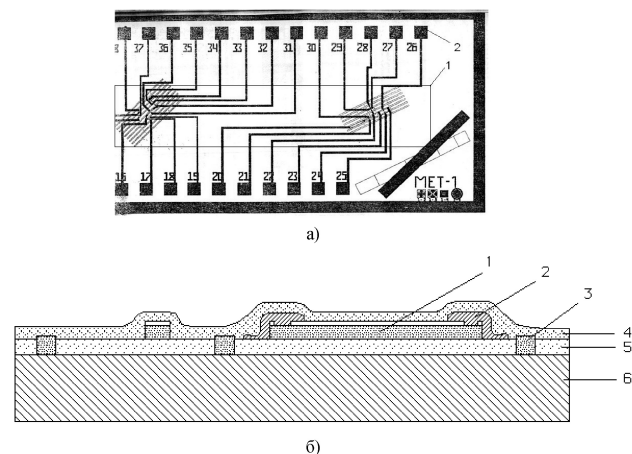


Рис. 1. Топологія тестових зразків типу MET-1 (а) та структура зразків (б): 1 — полі-Si резистор; 2 — алюмінієві контакти; 3 — затравки до моно-Si; 4 — захисний шар; 5 — ізолюючий шар SiO₂; 6 — монокристалічна підкладка.

Структура експериментальних тестових зразків типу MET-1 наведена на рис.1б. Всі зразки виготовлялись за інтегральною КМОН-технологією на стандартних Si пластинах (100) діаметром 100мм. Після проведення всіх технологічних операцій і контрольних вимірювань та розділення пластини на окремі кристали були виготовлені партії зразків КНІ-структур з різною концентрацією домішки (бору) та структурою, зокрема: (1)— дрібнокристалічна (нерекристалізована), що утворюється безпосередньо після осадження; (2)— крупнокристалічна, яка утворюється після скануючої лазерної рекристалізації полікремнію.

Сенсори температури

Для створення сенсорів температури досліджувались терморезистивні характеристики полі-Si зразків з різною концентрацією носіїв до і після лазерної рекристалізації. Вимірювання температурної залежності опору досліджуваних зразків проводились в різних температурних діапазонах. Результати вимірювань для інтервалу температур від -40...+140°C представлено на рис. 2.

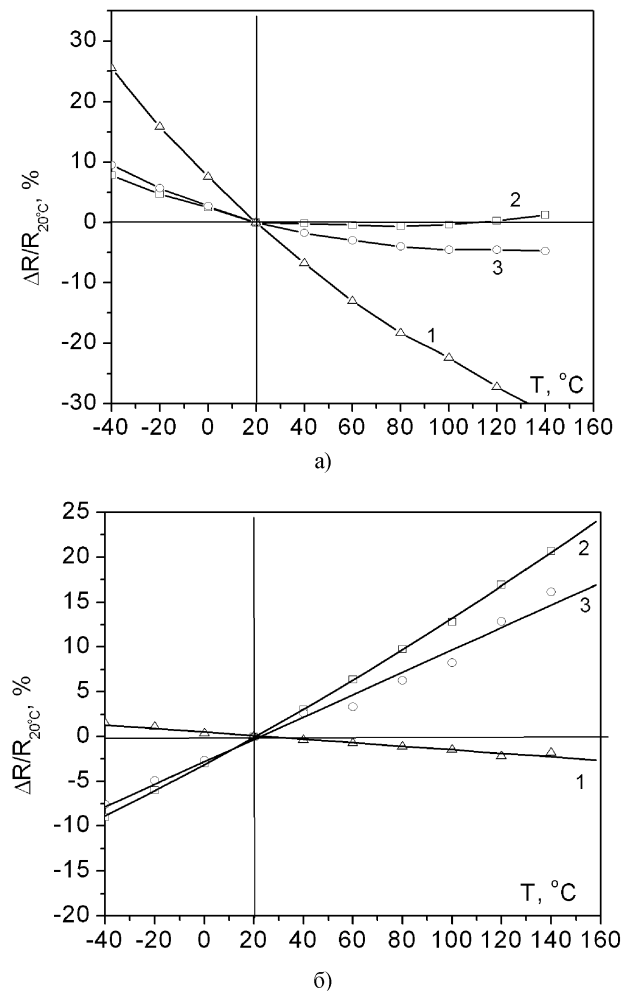


Рис. 2. Температурні залежності відносної зміни опору зразків полі-Si з різною початковою концентрацією носіїв заряду: (а) $2,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ до (1) і після (2,3) лазерної рекристалізації ($4,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) та (б) $3,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ до (1) і після (2,3) лазерної рекристалізації ($1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) у поздовжньому (2) і поперечному (3) напрямку стосовно лазерного сканування.

На основі аналізу одержаних температурних залежностей відносної зміни опору зразків полі-Si з різною концентрацією носіїв заряду створено сенсори температури для інтервалу $-40 \div +140 \text{ }^\circ\text{C}$ на основі нерекристалі-

зованих шарів полі-Si з концентрацією $2,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ і температурним коефіцієнтом опору $\text{TKO} = -0,28 \text{ } \%$ град $^{-1}$. Меншою чутливістю ($\text{TKO} = 0,15 \text{ } \%$ град $^{-1}$), але кращою стабільністю характеризуються сенсори температури на основі рекристалізованих лазером шарів полі-Si з концентрацією $1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Для створення сенсорів криогенних температур проводились низькотемпературні дослідження питомого опору полі-Si з різною концентрацією носіїв заряду ($3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \div 1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) до і після лазерної рекристалізації. Встановлено, що найбільш сильною температурною залежністю опору характеризуються нерекристалізовані шари полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (в інтервалі 4,2–50 K їх температурний коефіцієнт опору $\text{TKO} \approx 9 \text{ } \%$ K $^{-1}$) та рекристалізовані лазером шари полі-Si з $p_{300\text{K}} \approx 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (в інтервалі 4,2–50 K їх $\text{TKO} \approx 2,4 \text{ } \%$ K $^{-1}$) [5]. Такі шари полі-Si можна використовувати як чутливі елементи сенсорів для вимірювання низьких температур. Виходячи з того, що рекристалізовані шари полікремнію відрізняються кращою стабільністю у порівнянні з нерекристалізованими, для створення сенсорів температури найбільш придатні рекристалізовані шари полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} \approx 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Для оцінки можливості застосування низькотемпературних сенсорів на основі шарів полікремнію в сильних магнітних полях проводились вимірювання поперечного магнітоопору цих шарів при криогенних температурах до 4,2 K [6]. Було одержано експериментальні результати вимірювання магнітоопору досліджених шарів полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ та $2,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ в магнітних полях до 14 Тл. Для рекристалізованих шарів з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ зміна опору під впливом магнітного поля є слабкою: вона не перевищує 1,5% при температурі рідкого гелію в полях до 6 Т. Враховуючи сильну температурну залежність питомого опору рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ при низьких температурах і слабкий вплив магнітного поля на їх характеристики, можна зробити висновок, що такі шари полі-Si придатні для створення сенсорів криогенних температур, працездатних в сильних магнітних полях [7].

Створено мікроелектронний сенсор температури на основі КНІ-структур з рекристалізо-

ваним шаром полікремнію на ізоляторі з концентрацією носіїв $p_{300K}=7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На рис. 7. наведено градувальну характеристику такого сенсора.

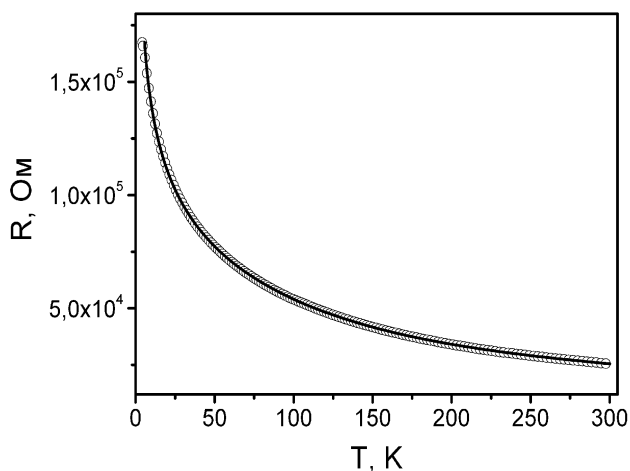


Рис. 3. Експериментальна каліброчна характеристика сенсора температури.

В широкому інтервалі температур 4,2–300 К характеристика такого сенсора описується за експоненційним законом:

$$T = A_1 \times \exp(-R/t_1) + A_2 \times \exp(-R/t_2) + A_3 \times \exp(-R/t_3) + y_0,$$

де $y_0=1,92$, $A_1=282,80$, $t_1=24986,87$, $A_2=261,63$, $t_2=38590,40$, $A_3=2470,46$, $t_3=6889,68$.

Для перевірки працездатності розробленого сенсора температури його було використано під час низькотемпературних досліджень. Покази, які реєструвались розробленим сенсором температури, додатково перевірялись за допомогою термопару Cu–Cu(Fe) з точністю $\sim 0,1$ °С за стандартною методикою. Спостерігалось співпадіння температурної залежності опору мікрочастинки кремнію, одержаною за допомогою розробленого сенсора та термопару, у всьому температурному інтервалі 4,2–300 К, що підтверджує працездатність розробленого сенсора.

Тензорезистивні сенсори механічних величин

Тензорезистивні характеристики шарів полі-Si на ізоляторі

Проведено експериментальні дослідження тензорезистивних властивостей полікремнію-вих структур з різною концентрацією носіїв у широкому інтервалі деформацій (від -2×10^{-3} до

$+2 \times 10^{-3}$ відн.од.) і температур. Вимірювання проводились на спеціальній установці з високою точністю задання деформації $\pm 0,001\%$.

Розрахунки коефіцієнтів тензочутливості (поздовжнього K_{\parallel} та поперечного K_{\perp}) проводилися за формулою:

$$K_{\parallel} = \frac{R_{\varepsilon} - R_0}{R_0 \varepsilon}, \quad (1)$$

де R_0 — початковий опір відповідно розміщеного (поздовжньо або поперечно осі балки) недеформованого зразка; R_{ε} — опір того самого зразка при поздовжній деформації ε .

На рис. 4 наведено одержані експериментально залежності відносної зміни опору шарів полікремнію від деформації для різних концентрацій носіїв заряду до і після лазерної рекристалізації. Результати вимірювання коефіцієнту тензочутливості та його температурної залежності для шарів полікремнію зведені у таблицю 1 [8].

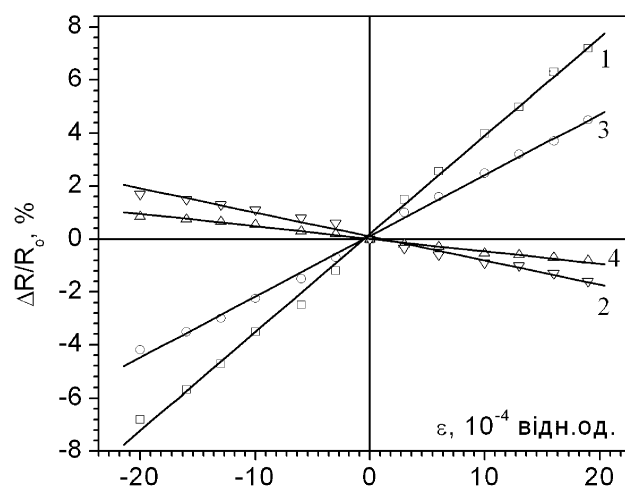


Рис. 4. Відносна зміна опору шарів полікремнію з деформацією: 1,2 — рекристалізований полікремній з концентрацією носіїв $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3,4 — нерекристалізований полікремній з концентрацією дірок $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 1,3 — поздовжній п'єзоопір; 2,4 — поперечний п'єзоопір.

Встановлено, що вздовж напрямку [110] поздовжня тензочутливість полікремнію додатня і становить $15 \div 40$, а поперечна від'ємна і дорівнює $-3 \div -12$. Загалом орієнтуюча лазерна рекристалізація значно збільшує як поздовжню, так і поперечну тензочутливість: поздовжній коефіцієнт тензочутливості зростає в $1,5 \div 1,7$ раза, а поперечний — у $2,1 \div 2,4$ раза. Ефект збільшується зі зниженням концентрації легуючої домішки.

Тензорезистивні характеристики шарів полікремнію

Концентр. носіїв, см^{-3}	Тензочутливість		Температурні коефіцієнти			Рекристалізація полі-Si
	поздовж. K_{\parallel}	попереч. K_{\perp}	Опору ТКО, град^{-1}	Тензочутливості		
				ТКК $_{\parallel}$, град^{-1}	ТКК $_{\perp}$, град^{-1}	
$2,4 \cdot 10^{18}$	23,5	-5,2	$-3,4 \cdot 10^{-3}$	$-2,6 \cdot 10^{-3}$	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	нерекр.
$4,8 \cdot 10^{18}$	38,2	-11,1	$-2,0 \cdot 10^{-4}$	$-2,1 \cdot 10^{-4}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	рекр.
$3,9 \cdot 10^{19}$	19,6	-3,4	$-1,8 \cdot 10^{-4}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-4,9 \cdot 10^{-3}$	нерекр.
$1,7 \cdot 10^{20}$	15,7	-4,8	$+1,5 \cdot 10^{-3}$	$-1,3 \cdot 10^{-4}$	$-1,9 \cdot 10^{-4}$	рекр.

Така поведінка відповідає значному збільшенню рухливості носіїв після рекристалізації. Наведені в таблиці 1 дані для рекристалізованих лазером шарів полі-Si відповідають структурі шарів полікремнію з середнім розміром зерна порядку декілька мікрон. При оптимізації технології лазерної рекристалізації були отримані зразки полі-Si шарів з розміром зерна, який становив кілька десятків мікрон. Для таких зразків отримано значно більший коефіцієнт тензочутливості: $K=42$ для концентрації $\sim 10^{18} \text{см}^{-3}$ та $K=26$ для концентрації $\sim 10^{20} \text{см}^{-3}$.

Мікроелектронні тензорезистивні сенсори тиску

1. Універсальний чутливий елемент сенсора тиску

При розробці чутливих елементів тензорезистивних сенсорів на основі КНІ-структур враховувались основні фактори, які впливають на характеристики сенсорів механічних величин: матеріал, форма і розміри мембран, кристалографічна орієнтація, технологія їх одержання, топологія чутливого елемента, рівень легування резисторів і їх кристалографічна орієнтація, розташування резисторів на мембрані.

На рис.5. наведено варіант топології чутливого елемента мікроелектронного сенсора тиску та розташування полі-Si тензорезисторів р-типу провідності, яке забезпечує максимальний вихідний сигнал мостової схеми [9]. Крім того, такий варіант топології добре вписується в технологічний процес виготовлення сенсора, в якому використовується анізотропне травлення кремнію як метод формування мембрани.

Розроблений чутливий елемент сенсорів є універсальним, оскільки, формуючи шляхом анізотропного травлення різну товщину мем-

брани такого чутливого елемента, можна отримувати сенсори для різних діапазонів тисків і, відповідно, змінювати галузь їх застосування.

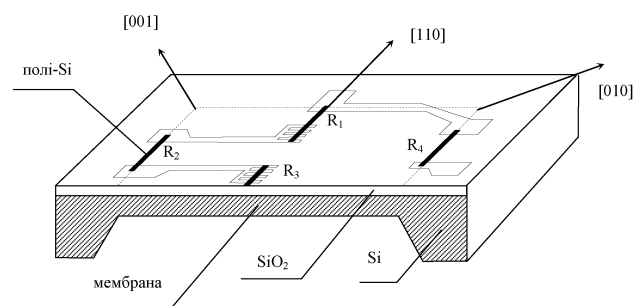


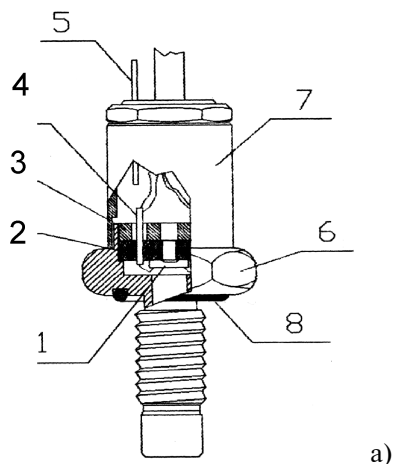
Рис. 5. Чутливий елемент сенсора тиску з полі-Si тензорезисторами (R1-R4), з'єднаними в мостову схему.

Слід відмітити, що в залежності від робочого діапазону температур сенсора тиску, вибирався відповідний рівень легування полі-Si тензорезисторів, щоб забезпечити максимальну температурну стабільність у поєднанні з високою тензочутливістю.

2. Високочастотні сенсори тиску

На основі створеного чутливого елемента розроблено високочастотний сенсор тиску, конструкція якого зображена на рис.6а, а зовнішній вигляд — на рис. 6б.

Дослідження характеристик експериментальних зразків сенсорів, виготовлених за розробленою технологією, проводилось на спеціальному стенді в інтервалі тисків від $0 \dots 1,6 \times 10^5$ Па ($0 \dots 1,6$ бар) до $0 \dots 2,5 \times 10^5$ Па ($0 \dots 2,5$ бар). Вимірювання проводились при фіксованих температурах в заданому інтервалі тисків. На рис.7 наведено залежності вихідного сигналу розроблених сенсорів від тиску в інтервалі $0 \dots 2,0 \times 10^5$ Па ($0 \dots 2,0$ бар) при кімнатній температурі. Основні параметри розроблених сенсорів зведені у таблицю 2.



а)



б)

Рис. 6. Мікроелектронний високочастотний сенсор тиску: (а)– конструкція сенсора: 1 – Si-чутливий елемент, 2 – скляна шайба, 3 – коварова шайба, 4 – струмовиводи, 5 – трубка, 6 – корпус, 7 – кришка, 8 – кільце; (б)– зовнішній вигляд сенсора.

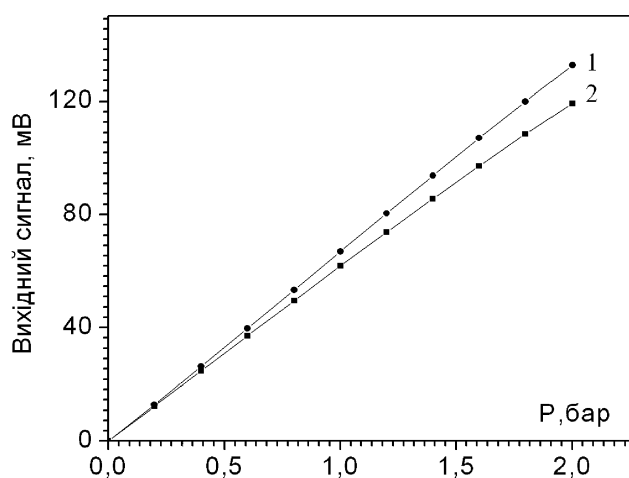


Рис. 7. Градувальні характеристики сенсорів тиску при 20°C.

Таблиця 2
Основні параметри високочастотних сенсорів тиску

Параметр	Значення
Інтервал тисків, бар	0...1,5; 0...2,5
Максимальний вихідний сигнал, мВ	100 ± 20
Максимальне перевантаження, %	200
Живлення: — напруга, В — струм, мА	5 ÷ 15 1 ÷ 5
Чутливість до тиску, мВ/(В·бар)	4 ÷ 10
Температурний дрейф нуля, мВ/°C	0.04 ÷ 0.07
Температурний коефіцієнт чутливості, %/°C	-(0.04 ÷ 0.05)
Власна частота, кГц	100 ÷ 200

Завдяки високій власній частоті (100÷200 кГц), розроблені сенсори успішно використовувались для аеродинамічних досліджень.

3. Мікроелектронний сенсор тиску медичного призначення

Мікроелектронні сенсори тиску медичного призначення розроблялись на основі універсального чутливого елемента для вимірювання малих тисків (~ 300 мм рт.ст.) [10]. Характеристики розроблених сенсорів тиску медичного призначення досліджувались в інтервалі тисків 0...5×10⁴ Па (0...0,5 бар) в температурному інтервалі +20...+60°C.

На рис.8 показано залежність вихідного сигналу такого сенсора від тиску при кімнатній температурі. Вихідний сигнал розроблених сенсорів при 20°C дорівнює 50±5 мВ, чутливість становить ≈10 мВ/(В·бар), температурний коефіцієнт вихідного сигналу ≤0,04 %-град⁻¹. Такі сенсори призначені для вимірювання артеріального тиску і можуть застосовуватись у медичних пульсоманометрах (тонометрах).

4. Сенсор тиску-температури

Сенсор тиску-температури створювався на основі мікроелектронного тензорезистивного сенсора тиску, який містить чотири полі-Si тензорезистори (R1-R4), розташовані на мембрані і з'єднані у мостову схему (рис.9а). Для вимірювання температури сенсор містить два термочутливі полі-Si резистори (R5-R6), які розташовані на планарній стороні поза межами пружного елемента — мембрани (рис.9а,б). За-

вдяки цьому при навантаженні сенсора тиском деформація термочутливих полі-Si резисторів є незначною, і, відповідно, вони реагують тільки на зміну температури [11]. Легування бором полі-Si терморезисторів, що відрізняються рівнем легування від полі-Si тензорезисторів, які використовуються в сенсорах тиску, проводилось до таких концентрацій, які забезпечують максимальний температурний коефіцієнт опору (ТКО) у заданих діапазонах температур. Крім того, полі-Si терморезистори мають також додатковий захисний шар з піролітичного діоксиду кремнію, що сприяє підвищенню стабільності їх характеристик під час дії дестабілізуючих факторів.

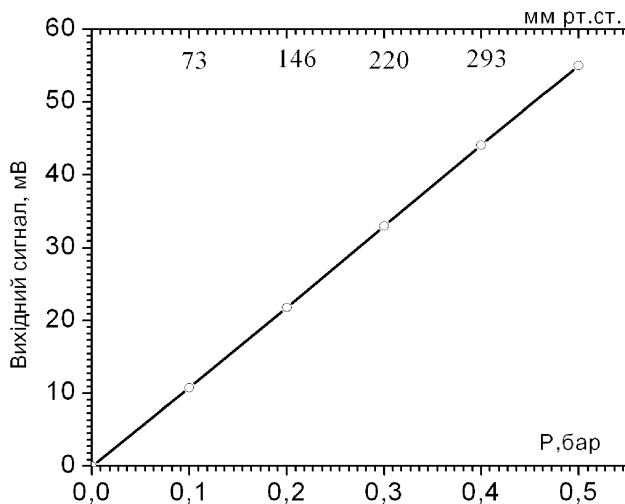


Рис. 8. Градувальна характеристика тензорезистивного сенсора медичного призначення.

За розробленою топологією були виготовлені експериментальні зразки мікроелектронних сенсорів тиску-температури для наступних інтервалів тиску і температури:

- 1) $0 \dots 1,6 \times 10^5$ Па ($0 \dots 1,6$ бар) і температур $-40 \dots +60^\circ$ С;
- 2) $0 \dots 2,4 \times 10^5$ Па ($0 \dots 2,4$ бар) і температур $20 \dots +150^\circ$ С.

На рис.10а наведено залежність вихідного сигналу сенсора тиску-температури від тиску в інтервалі температур $20 \dots +150^\circ$ С, а на рис.10б — температурну залежність опору термочутливого елемента того ж сенсора. Основні параметри розроблених сенсорів зведені в таблицю 3.

Як видно з наведених даних, чутливість розроблених мікроелектронних сенсорів тиску-температури є достатньою для вимірювання обох параметрів.

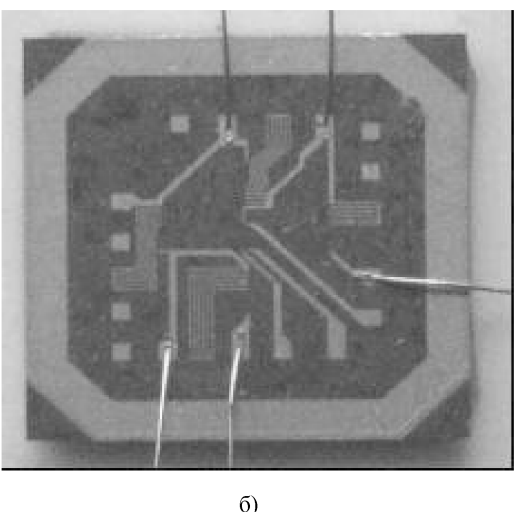
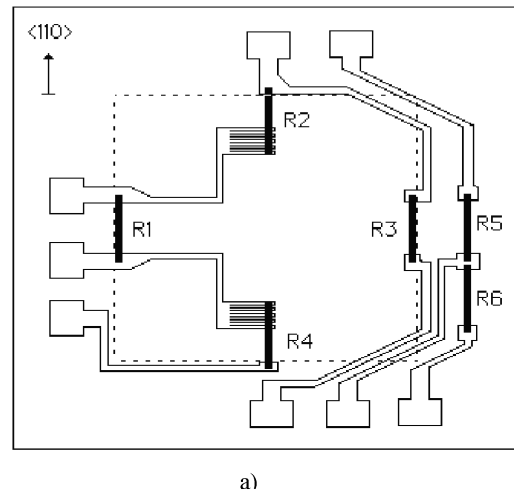


Рис. 9. Чутливий елемент мікроелектронного сенсора тиску-температури: (а)– топологія: R1-R4 — полі-Si тензорезистори, R5-R6– полі-Si терморезистори; (б)– мікрофотографія чутливого елемента.

Таблиця 3
Основні параметри розроблених сенсорів тиску-температури

Параметр	Значення
Інтервал тисків, бар	$0 \dots 1,6$; $0 \dots 2,5$
Максимальний вихідний сигнал по тиску, мВ	~ 100
Максимальне перевантаження, %	200
Живлення: — напруга, В — струм, мА	$5 \div 15$ $1 \div 5$
Чутливість до тиску, мВ/(В·бар)	$4 \div 10$
Інтервал робочих температур, °С	$-40 \dots +150$
Температурний дрейф нуля, мВ/°С	$0,04 \div 0,07$
Температурний коефіцієнт чутливості до тиску, %/°С	$-(0,04 \div 0,05)$
Чутливість до температури, ТКО %/°С	$-0,386$

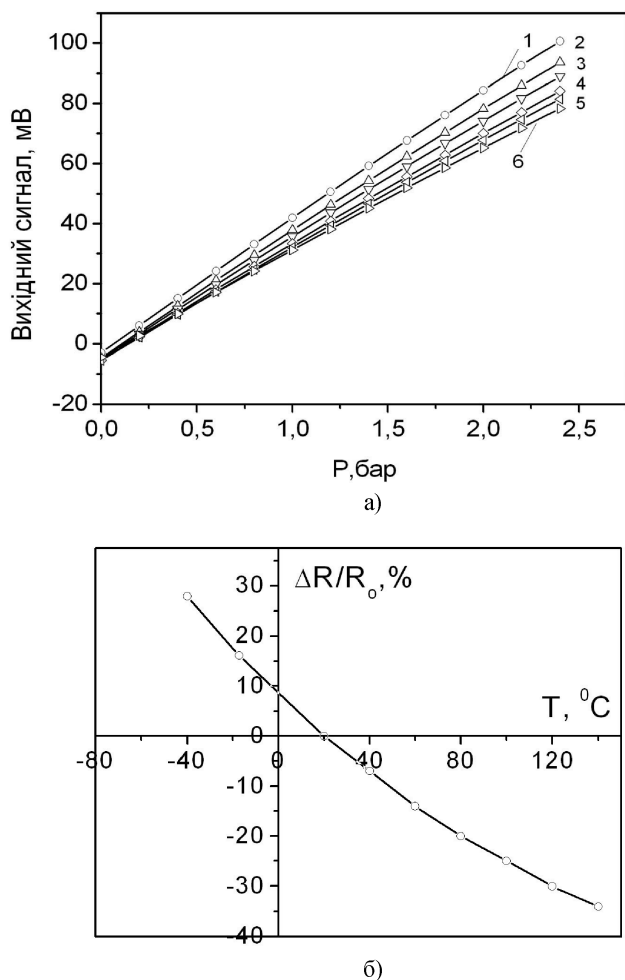


Рис. 10. Залежність вихідного сигналу сенсора тиску-температури від тиску при температурах (а): 1 – 20°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C, 4 – 100°C, 5 – 125°C, 6 – 150°C; (б) – температурна залежність відносної зміни опору термочутливого елемента сенсора.

Мікроелектронний ємнісний сенсор тиску

У роботі чутливого елемента ємнісного сенсора тиску використовується метод конденсатора зі змінною ємністю (рис. 11.), в якому під дією тиску змінюється зазор між обкладками конденсатора, а це, відповідно, призводить до зміни вихідного сигналу сенсора. Основу чутливого елемента сенсора становить монокристалічна підкладка (7) кремнію р-типу провідності (КДБ-80). Нерухомий електрод утворений захищеною областю сильнолегованого кремнію p^+ -типу (8). Мембрана, що має круглу форму, складається з шару сильнолегованого p^+ -полікремнію (2) і захисного шару фосфорно-сілікатного скла (1). Комплексне використання процесів анізотропного травлення монокри-

сталічної кремнієвої підкладки та ізотропного травлення захищеного шару піролітичного SiO_2 дозволило виготовити порожнину рухомого електроду, що є мембраною чутливого елемента сенсора. Порожнина, утворена витравленням локальних острівків захищеного шару піролітичного SiO_2 визначала зазор між обкладками конденсатора.

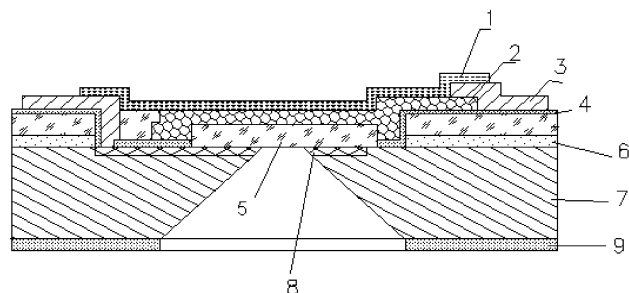


Рис. 11. Поперечний переріз структури розробленого чутливого елемента ємнісного сенсора тиску: 1 – захисний шар фосфорно-сілікатного скла, 2 – рухомий електрод, 3 – Al контакти, 4 – роздільний шар Si_3N_4 , 5 – зазор між обкладками конденсатора (піролітичний SiO_2), 6 – шар SiO_2 (термічний), 7 – Si-підкладка, 8 – нерухомий електрод, 9 – захисний шар для анізотропного травлення.

Було проведено дослідження вихідних характеристик експериментальних зразків ємнісних сенсорів тиску. Початкова ємність досліджуваних сенсорів становила $6,8 \div 12,1$ пФ і в подальшому зростала з підвищенням тиску. Чутливість таких сенсорів становила $(2,5 \div 2,6) \times 10^{-2}$ пФ/мм Hg (або $(1,9 \div 1,95) \times 10^{-4}$ пФ/Па) для діапазону тисків $0 \div 180$ мм Hg і $2,2 \times 10^{-2}$ пФ/мм Hg ($1,7 \times 10^{-4}$ пФ/Па) для діапазону $0 \div 300$ мм Hg. Такі сенсори можуть використовуватись для вимірювання артеріального тиску.

Висновки

Розроблено технологію створення структур “кремній на ізоляторі” з рекристалізованим лазером шаром полікремнію для створення мікроелектронних сенсорів механічних і теплових величин.

Розроблено *сенсори температури* як для криогенних, так і для підвищених температур, а також сенсори криогенних температур, працездатні в сильних магнітних полях.

Створено мікроелектронні *тензорезистивні сенсори тиску різного призначення*:

– *високочастотні сенсори* для аеродинамічних досліджень;

— медичного призначення для застосування у тонометрах;

— *сенсори тиску — температури* для різних діапазонів тисків і температур;

Розроблено мікроелектронний *ємнісний сенсор* для вимірювання артеріального тиску.

Список літератури

1. Мокров Е.А.. Интегральные датчики. Состояние разработок и производства. Направление развития, объемы рынка // Датчики и системы. — №1. — 2000. — С.28–30.
2. Bogue W. The role of materials in advanced sensor technology// Sensor Rev. — 2002. — Vol.22, No4. — P.289-299.
3. Гиваргизов Е.И. Искусственная эпитаксия — перспективная технология элементной базы микроэлектроники. М.: Наука, 1988. — 177 с.
4. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Kogut I.T., Pankevich I.M., Deschinsky Y.L. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator // Phys. and Tech. Probl. of SOI Struct. and Devices. J.P.Collinge et al. (eds.) NATO ASI Series. Kluwer Acad. Publishers, Netherlands, 1995. — P.101–105.
5. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Когут І.Т., Ховерко Ю.М. Дослідження низькотемпературних характеристик шарів полікремнію на ізоляторі для створення сенсорів теплових і механічних величин // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2006. — № 2. — С. 10–15.
6. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I. et al. Polysilicon-on-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields // Science and Technology of SOI Structures and Devices Operating in a Harsh Environment: ed. by D. Flandre et al. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. — 2005. — P. 297-302.
7. Патент № 22368 Україна, МПК G01K 7/00. Чутливий елемент мікроелектронного сенсора для вимірювання криогенних температур в сильних магнітних полях / Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Когут І.Т., Ховерко Ю.М.; Національний університет “Львівська політехніка” — № u200611374; Заявл. 30.10.2006; Опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5. — 3 с.
8. Voronin V.A., Maryamova I.I., Druzhinin A.A., Lavitska E.N., Pankov Y.M. SOI pressure sensors based on laser recrystallized polysilicon // Phys. and Tech. Probl. of SOI Struct. and Devices. J.P.Collinge et al. (eds.) NATO ASI Series. Kluwer Acad. Publishers, Netherlands. — 1995. — P.281–286.
9. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Voronin V. Mechanical sensors based on laser-recrystallized SOI structures. Sensors and Actuators A. Physical. — 1997. — Vol.A61. — P.400-404.
10. A.Druzhinin, E.Lavitska, I.Maryamova. Medical pressure sensors on the basis of silicon microcrystals and SOI layers. Sensors and Actuators. — 1999. — Vol.B58. — P. 415-419.
11. A.Druzhinin, E.Lavitska, I.Maryamova, I.Kogut, Y.Khoverko. On possibility to extend the operation temperature range of SOI sensors with polysilicon piezoresistors. Journal of Telecommunications and Information Technology. — 2001. — №1. — P.40-45.