

На рис.2 наведено результати дослідження нормованої характеристики перетворення виміральної схеми на основі латерального магнітотранзистора та розробленого лінеаризатора при різних значеннях коефіцієнта  $Z$ . З наведеного графіка видно, що можна змінювати величину та знак крутизни характеристики перетворення, що в остаточному результаті забезпечує лінеаризацію, компресію чи декомпресію функціональної характеристики магнітосенсорного пристрою.

Розроблені лінеаризатори характеристики перетворення забезпечують незалежне встановлення як функціонально завершених ІС чи як частина магнітосенсорної схеми дозволяють спростити процес лінеаризації. Принциповою перевагою такого методу реалізації схем є незалежність параметрів вихідного сигналу від невідтворюваності абсолютних номіналів інтегральних резисторів і відповідних температурних коефіцієнтів опору і відсутність багатоітераційності у процесі термокомпенсації. Регулювання температурного коефіцієнта напруги термокомпенсації запропонованих ІС в межах  $-5...+7$  мВ/К а також введення керованої параболічної нелінійності забезпечує можливість їх широкого застосування в різноманітних магнітосенсорних ІС.

1. Z.Gotra, W.Kalita, R.Golyaka, M.Gladoun *Principles of high-sensitive magneto-controlled integrated circuit creation // Proc. of 18-th Conference of ISHM Poland, Warsaw, 1994, pp.125-128.* 2. Z. Gotra, R.Golyaka, M.Gladoun *Magnetotransistors in the integrated sensor devices // Proc. of 1-st International Symposium on "Microelectronics Technologies and Microsystems", Poland, 1997. Pp.21-26.* 3. D.Bursky *Digital ICs become the system as complexities increase // Electronic Devices, 1992, #24, pp.66-70.*

УДК 621.315.592

**А.О.Дружинін, О.М.Лавитська, І.Й.Мар'ямова, Ю.М.Панков, Ю.М.Ховерко**  
ДУ "Львівська політехніка", кафедра напівпровідникової електроніки

## **МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ ШАРІВ КНІ, РЕКРИСТАЛІЗОВАНИХ ЛАЗЕРНИМ ОПРОМІНЕННЯМ**

© А.О.Дружинін, О.М.Лавитська, І.Й.Мар'ямова, Ю.М.Панков, Ю.М.Ховерко, 2000

**Описується зміст теоретичних, експериментальних, технологічних науково-дослідних робіт із метою створення українського промислового мікроелектронного сенсора тиску. Обговорюється використання лазерної рекристалізації в технології сенсорів як метода покращання характеристик КНІ п'єзорезисторів.**

**The content of R&D works (theory, experimental, design and technology) performed in the «Lviv Polytechnic» State University in order to develop commercial Ukrainian microelectronic SOI pressure sensors is presented. The use of the microzone laser recrystallisation in sensor technology as a method to obtain improved performances of SOI piezoresistor is discussed.**

### **1. Вступ**

Створення українського промислового мікроелектронного сенсора тиску на основі КНІ структур було започатковано у 90-х роках, коли дві групи фахівців в галузі КНІ технології

[1] та в галузі сенсорів механічних величин на основі напівпровідникових мікрочастин [2] поєднали свої зусилля. Особливістю наших науково-дослідних робіт стало використання мікрозонної лазерної рекристалізації (МЛР) в технології сенсорів з метою покращання чутливості полікремнієвих п'єзорезисторів. Цей метод дозволяє локально розплавлювати шари полі-Si, контролювати процеси росту кристалітів та формування дефектів, змінювати структуру і параметри напівпровідникового шару. Для виявлення можливостей МЛР в технології п'єзорезистивних сенсорів механічних величин проведено ряд теоретичних та експериментальних досліджень [3-5].

Фізичну модель п'єзоопору в полікремнії розроблено з урахуванням внеску в цей ефект потенціальних бар'єрів на межах зерна (МЗ) та структури шарів полі-Si. Вважалось, що легуюча домішка рівномірно розподілена у плівці, а носії заряду захоплюються вловлювачами на межах зерен, спричиняючи появу областей просторового заряду в зернах поблизу їх меж [6]. Вважалось, що перенос носіїв заряду через потенціальний бар'єр здійснюється термоелектронною емісією та дифузією. Висота бар'єра не залежить від зовнішньої деформації, а п'єзоопір області потенціального бар'єра в полі-Si зумовлюється зміною швидкостей дрейфу та рекомбінації. Теоретично та експериментально досліджено ефект Холла, поздовжній та поперечний п'єзоопір шарів полікремнію, легуваних бором. Спеціальну увагу приділяли цікавим з практичного погляду зразкам з концентрацією носіїв заряду  $N = 1 \times 10^{18} - 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  та середнім розміром зерна від 50 нм до 100 мкм.

## 2. Технологія лазерної рекристалізації

Зразки виготовляли за стандартною технологією інтегральних схем на основі шарів полі-Si 0,5 мм, осаджених методом LPCVD при  $625^\circ\text{C}$  на термічно окислені пластини кремнію р-типу провідності з орієнтацією (100). Легування бором проводили іонною імплантацією. Шари полікремнію рекристалізували на повітрі опроміненням лазера CW YAG ( $\lambda=1,06 \text{ }\mu\text{m}$ , потужність 10-20 Вт) скануючи поверхню пластини променем лазера, сфокусованим до плями  $\varnothing = 150 \text{ мкм}$ . Для оптимізації технології лазерної обробки на пластини попередньо наносилось комбіноване покриття, яке містило плівки  $\text{SiO}_2$  та смужки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Таке покриття утворювало певний температурний профіль під час лазерної обробки, який визначав локалізацію дефектів та стабілізував ріст кристалітів. Оскільки антивідбивна дія покриття залежить від товщини плівки, було проведено числові розрахунки на основі методики, запропонованої в [4]. За результатами цих розрахунків обрано товщини шарів  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Si}_3\text{N}_4$  відповідно 0,75 та 0,15 мкм.

Досліджували структурні зміни шарів полікремнію та вплив зародкоутворення на бічний епітаксійний ріст монокристалічного кремнію на  $\text{SiO}_2$  в процесі лазерної рекристалізації. Аналіз отриманих результатів показав, що область зародкоутворення під дією скануючого лазерного опромінення розплавлялась і відбувалась її рекристалізація епітаксією. Показано, що ефективний бічний ріст монокристалу від зародку в бік підкладки кремнію-на-ізоляторі (КНІ) залежить від компланарності шару  $\text{SiO}_2$  та монокристалічності кремнієвої пластини.

Для бічного епітаксійного росту шар полікремнію повинний бути розплавлений як поблизу зародку, так і на поверхні  $\text{SiO}_2$ . Однак потужність лазерного опромінення є обмеженою. Для отримання однорідного температурного профілю використовували шар  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ , який створював такі умови рекристалізації, що сприяють повному розплавленню

полі-Si як в області зародка, так і на поверхні SiO<sub>2</sub> при тій самій потужності лазерного опромінення. Встановлено, що зародкова область рекристалізувалась через формування монокристалічного шару без границь зерен. При віддаленні зони розплаву від зародку в бік полікремнію-на-ізоляторі спостерігався бічний епітаксійний ріст кристалітів з нахилом в бік напрямку сканування. Слід відзначити, що при рекристалізації полі-Si великі кристаліти формувались, якщо зародки були паралельними до напрямку сканування. В таких умовах фронт рекристалізації рухався від області зародка без утворення небажаних центрів кристалізації. Після лазерної обробки КНІ-структур з кількома центрами зародкоутворення ми отримали монокристалічні області кремнію на ізолюючій підкладці площею 500×100 мм<sup>2</sup>. Отже, при оптимальному розташуванні областей зародкоутворення можна отримати монокристалічні ділянки на ізолюючій підкладці з площею, достатньою для виготовлення елементів інтегральних схем та мікроелектронних сенсорів. Детальніший опис технології лазерної рекристалізації наведено в [1].

### 3. Експеримент

Результати експериментальних досліджень електрофізичних та п'єзорезистивних властивостей тестових зразків полі-Si наведені у табл. 1.

Таблиця 1

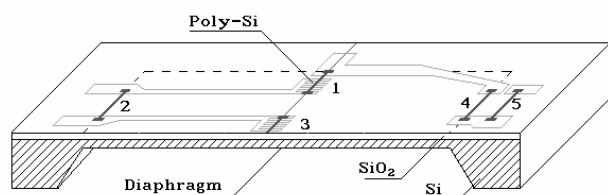
**Електрофізичні та п'єзорезистивні властивості тестових зразків КНІ**

$\rho$ , см <sup>-3</sup>	Коефіцієнт тензочутлив. поздовж.	Коефіцієнт тензочутлив. поперечн.	ТКО, град <sup>-1</sup>	Поздовжній ТКТЧ, град <sup>-1</sup>	Поперечний ТКТЧ, град <sup>-1</sup>	Рекристалізація, так/ні
$2,4 \times 10^{18}$	23,5	-5,2	$-3,6 \times 10^{-3}$	$-2,6 \times 10^{-3}$	$-2,5 \times 10^{-3}$	так
$4,4 \times 10^{18}$	38,2	-11,1	$-2,0 \times 10^{-3}$	$-2,1 \times 10^{-4}$	$-2,3 \times 10^{-3}$	ні
$3,9 \times 10^{19}$	19,6	-3,4	$-2,5 \times 10^{-4}$	$-1,7 \times 10^{-3}$	$-4,9 \times 10^{-3}$	так
$1,7 \times 10^{20}$	15,7	-4,8	$+1,2 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,9 \times 10^{-4}$	ні

Після лазерної рекристалізації поздовжній коефіцієнт тензочутливості полі-Si п'єзорезисторів  $G_L$  збільшується в 1,5-1,7 раза для концентрацій носіїв заряду  $1 \times 10^{18} - 5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Одночасно питомий опір таких зразків полі-Si після МЛР істотно зменшується. Беручи до уваги температурно-залежні характеристики зразків полікремнію (температурний коефіцієнт питомого опору ТКО та температурний коефіцієнт тензочутливості ТКТЧ), показано, що лазерна рекристалізація є найбільш рекомендованою з точки зору параметрів полі-Si п'єзорезисторів для концентрацій близько  $(1-5) \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

### 4. П'єзорезистивні сенсори тиску з КНІ п'єзорезисторами

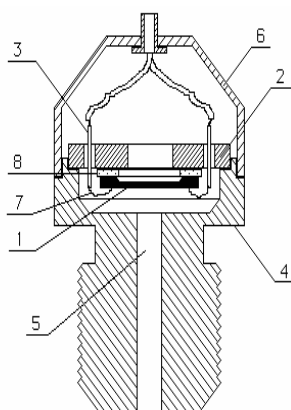
Конструкція чутливого елемента сенсора тиску містить мембрану 2×2 мм<sup>2</sup>, яка утворювалась за допомогою анізотропного травлення Si підкладки. Діапазон тиску регулювали підбором товщини мембрани. Враховуючи анізотропний характер процесу травлення, края мембрани орієнтували вздовж напрямку [110]. Поздовжні осі полі-Si п'єзорезисторів, з'єднаних у повну мостову схему, орієнтували вздовж напрямку [110], який одночасно відповідав напрямку лазерного сканування. Спрощену топологію чутливого елемента сенсора наведено на рис.1. Технологія виготовлення сенсорів будувалась на технологічному процесі виготовлення інтегральних схем, але передбачала декілька специфічних операцій.



**Рис.1.** Топологія чутливого елемента сенсора тиску:

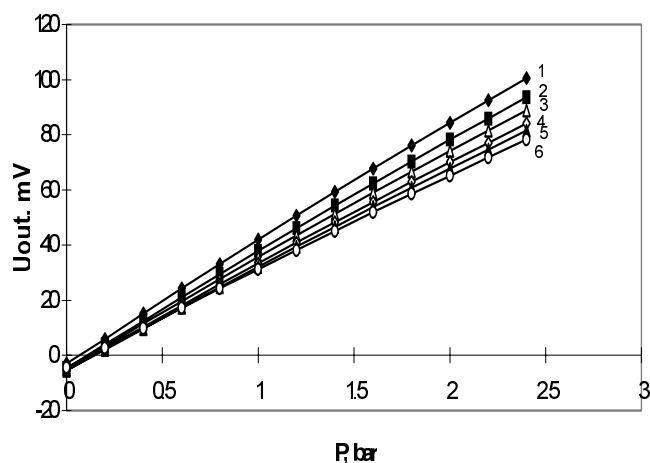
- 1 - п'єзорезистори,
- 2 - резистор для термокомпенсації

КНІ сенсори тиску розроблено в кількох модифікаціях, зокрема високотемпературні сенсори (до  $+300^{\circ}\text{C}$ ), а також сенсори для медичних застосувань. Конструкцію сенсора тиску для роботи при високих температурах в діапазоні тисків 0-5 бар наведено на рис.2.



**Рис.2.** Спрощена конструкція сенсора тиску для застосування при підвищених температурах:

- 1 - кремнієвий чутливий елемент,
- 2 - кільце з ковару,
- 3 - коварові стрижні,
- 4 - корпус,
- 5 - канал для підведення тиску,
- 6 - кришка,
- 7 - токовводи,
- 8 - скляне кільце



**Рис.3.** Вихідний сигнал сенсора для кількох температур,  $^{\circ}\text{C}$ :  
 1 - 19; 2 - 52,5; 3 - 76,6; 4 - 100;  
 5 - 125; 6 - 153,5

Діапазони робочих тисків розроблених сенсорів залежно від застосування становили від 0...0.4 до 0...10 бар, максимальне перевантаження - 200 %. Чутливість сенсорів змінювалась в межах від 5 до 15 мВ/(В×бар) при живленні від джерела напруги 5-15 В або струмом 1-5 мА. Робочі діапазони температур:  $-60...+60$  та  $20...300^{\circ}\text{C}$ . Температурний коефіцієнт дрейфу нуля був в межах 0.02-0.03 %F.S./ $^{\circ}\text{C}$ . Температурний коефіцієнт чутливості  $-(0.04...0.05) \%/^{\circ}\text{C}$ , температурний дрейф при  $20^{\circ}\text{C}$ :  $\approx 0.03 \%$ F.S./день. Вихідний

сигнал сенсора для концентрації бора в полікремнієвих п'єзорезисторах  $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  наведено на рис.3 для температур в діапазоні від  $+19$  до  $+153^\circ\text{C}$ . Показано, що температурні коефіцієнти опору та тензочутливості (вихідного сигналу) можна регулювати відповідним вибором рівня легування полі-Si.

Розроблено серійну технологію сенсора тиску для спільного виробництва з АТ «Родон» (Івано-Франківськ).

### Висновки

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження шарів полікремнію-на-ізоляторі, легованих бором, до і після лазерної рекристалізації. В дрібнозернистого полі-Si потенціально бар'єри на границях зерен є фактором, який лімітує електропровідність навіть при високих концентраціях домішки.

Для порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментів для полі-Si шарів до і після лазерної рекристалізації слід брати до уваги подвійну дію лазерної обробки: збільшення середнього розміру зерна та зростання концентрації носіїв заряду. Завдяки цьому для високих концентрацій спостерігалось дуже незначне збільшення (або навіть взагалі не спостерігалось) коефіцієнта тензочутливості полі-Si п'єзорезисторів після рекристалізації: збільшення коефіцієнта тензочутливості  $G$  завдяки збільшенню зерен компенсувалось зменшенням  $G$  через ріст концентрації. Водночас для менших рівнів легування ( $< 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) зростання концентрації носіїв заряду не призводить до зменшення  $G$  [5]. Отже, рівні легування  $1 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  є найбільш рекомендованими для лазерної рекристалізації з метою отримання максимального коефіцієнта тензочутливості. Показано, що лазерна рекристалізація полі-Si п'єзорезисторів для концентрацій  $1 \times 10^{18} - 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  призводить до збільшення поздовжнього коефіцієнта тензочутливості в 1,5-1,7 раза та веде до зменшення температурних коефіцієнтів опору та тензочутливості.

Результати досліджень використано для розроблення п'єзорезистивних сенсорів тиску.

1. Voronin V., Druzhinin A., Kostur V. et al. Laser-induced epitaxial growth of silicon layers on insulating substrates. Proc. 1st European Conf. on Crystal Growth, Budapest, Hungary, Apr. 1-7, 1990, Crystal Prop. Prep., 1991, pp.32-34. 2. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors. Sensors and Actuators, 1992, Vol.30A, pp.27-33. 3. Voronin V., Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Pankov Y. SOI pressure sensors based on laser recrystallized polysilicon. Phys. and Tech. Problems of SOI Struct. and Device, NATO ASI Series, J.P.Colinge et al. (eds.), Kluwer Acad. Pub., 1995, pp.281-286. 4. Druzhinin A., Kostur V., Kogut I., Pankevich I. et al. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator. Phys. and Tech. Problems of SOI Struct. and Devices, NATO ASI Series, J.P.Colinge et al. (eds.), Kluwer Acad. Pub., 1995, pp.101-105. 5. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Kogut I. Laser recrystallization of polysilicon in sensor technology: possibilities and restrictions. Silicon-on-Insulator Technology and Devices, ed. by S.Cristoloveanu, Electrochemical Soc. Proc., 97-23, Pennington, NJ, 1997, pp.92-97. 6. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Voronin V. Mechanical sensors based on laser-recrystallized SOI structures. Sensors and Actuators, 1997, Vol.61A, pp.400-404. 7. J.Seto. The electrical properties of polycrystalline silicon films. J.Appl.Phys., 1975, Vol.46, pp.5247-5254.