

В. МАЧУЛІН, Я. ЛЕПІХ, Я. ОЛІХ, Б. РОМАНЮК

АКУСТОЙОННІ ТА АКУСТОЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ

Сучасне виробництво напівпровідникових приладів ґрунтується переважно на кремнієвій технології виготовлення КМОН-структур. Удосконалення таких структур спрямоване на зменшення товщини підзатворного діелектрика, збільшення рівня легування каналу і ділянок сток-висток, а також зменшення глибини залягання *p-n* переходу. Для одержання надмілких *p-n* переходів необхідно зменшити глибину залягання легуючого шару і знизити поверхневий опір, що потребує збільшення ступеня активації домішки. І досі основними методами розв'язання цієї проблеми залишаються йонно-променева модифікація та синтез нових матеріалів з використанням іонних пучків. Ці технології активно розвиваються у світі і належать до технологій високого рівня.

Новий підхід до вирішення означеного завдання — акустоїонні технології [1–6]. Він полягає у використанні ультразвукової (УЗ) обробки напівпровідникових пластин під час імплантації (синтез, йонно-промене-

ва обробка) для керування концентрацією точкових дефектів і стимулювання електричної активації домішки. Ідея базується на результатах, отриманих упродовж останнього десятиліття щодо УЗ керування параметрами напівпровідникових матеріалів та характеристиками приладів, виготовлених на їх основі. Механізм такої дії визначається взаємодією УЗ із системою структурних дефектів кристала, а самі акустостимульовані явища пов'язані з індукованими змінами у системі електрично- та оптично-активних дефектів [7]. Можливість акустостимульованого прискорення процесів дифузії домішкових атомів і власних дефектів дає змогу розглядати УЗ обробку у трьох аспектах: як доволі перспективну для модифікації параметрів матеріалів та готових напівпровідникових приладів; як самостійну ланку відповідної технології; як додаткову дію у стандартних процесах. На рис.1 наведено схематичне зображення УЗ комірки-тримача для імплантації кремнію в умовах УЗ навантаження.

© МАЧУЛІН Володимир Федорович. Член-кореспондент НАН України. Директор Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (Київ).

ЛЕПІХ Ярослав Ілліч. Доктор фізико-математичних наук. Завідувач лабораторії Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова.

ОЛІХ Ярослав Михайлович. Кандидат фізико-математичних наук. Старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

РОМАНЮК Борис Миколайович. Доктор фізико-математичних наук. Провідний науковий співробітник цієї установи. 2007.

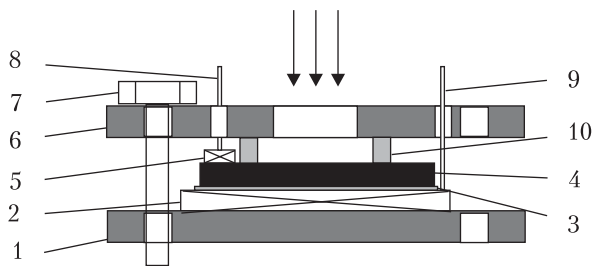


Рис. 1. Схематичне зображення УЗ комірки-тримача для імплантації кремнію в умовах УЗ навантаження. 1 – корпус-основа; 2 – збуджуючий п'єзоперетворювач П1; 3 – акустична зв'язка; 4 – пластина кремнію; 5 – контрольний п'єзоперетворювач П2; 6 – корпус-кришка з вікном для імплантації; 7 – болти кріплення; 8, 9 – ВЧ підводи приймального та збуджуючого п'єзоперетворювачів, відповідно; 10 – ущільнююче гумове кільце

Наведемо деякі принципи результати використання ультразвуку у $h-n$ процесі (in situ) формування надмілких $p-n$ переходів. По-перше, це звуження профілю імплантованого в кремній бору. На рис. 2 показано профілі розподілу атомів бору В, імплантованого у кремній під дією УЗ і в подальшому відпалених за температури $900\text{ }^\circ\text{C}$ [1].

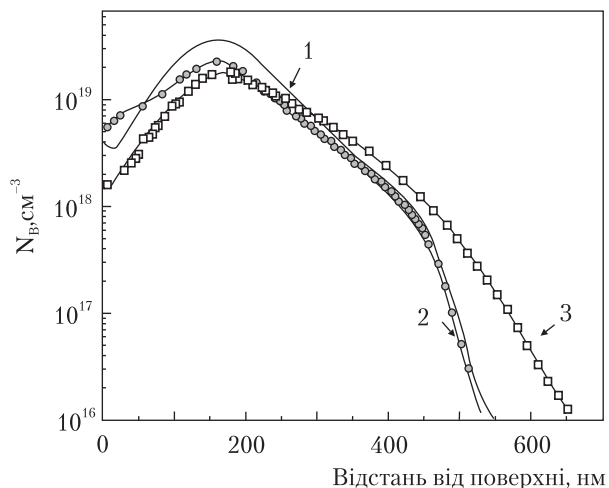


Рис. 2. Профілі розподілу атомів бору В у зразках Si, отримані методом вторинної йонно-маспектроскопії: крива 1 – контрольний зразок до відпалу; 2, 3 – після відпалу за $900\text{ }^\circ\text{C}$, 30 с; зразок 2 імплантований за одночасної дії УЗ; 3 – контрольний, імплантований без УЗ

Видно, що відпал кремнієвої структури ($900\text{ }^\circ\text{C}$, 30 с), імплантованої без УЗ-коливань, призводить до зміщення хвостової частини профілю розподілу бору (крива 3) углиб зразка. Разом з тим хвостова частина профілю розподілу бору, імплантованого під впливом ультразвуку, залишається незмінною навіть у разі відпалу (крива 2). Встановлено, що під дією УЗ хвилі (на частоті $f_{\text{уз}} \approx 10\text{ МГц}$, інтенсивність $W_{\text{уз}} \approx (0,1-0,5)10^4\text{ Вт/м}^2$) відбувається акустостимульоване видалення з ділянки імплантації міжвузлових атомів, які утворюються під час йонної імплантації пластин кремнію. Причому у приповерхневій ділянці накопичуються вакансійні дефекти і відбувається частковий відпал радіаційних дефектів та активація імплантованих атомів уже в процесі їхньої імплантації.

УЗ також істотно впливає на структуру приповерхневої ділянки кремнію при імплантації атомів Ag – спостерігається збільшення товщини аморфізованого шару [2, 3]. При цьому аморфний шар виникає вже безпосередньо на поверхні пластини, його товщина зростає в $\sim 1,3$ рази. УЗ хвиля у нерівноважних умовах йонної імплантації спричинює рух внутрішньої межі розділу аморфної та кристалічної фаз до поверхні. Збільшення товщини аморфного шару теж визначається акустостимульованим просторовим розділенням більш рухомих міжвузлових атомів і вакансій. Отже, використання in situ УЗ обробки дає змогу знизити критичну дозу аморфізації та отримати суцільний аморфний шар за істотно менших концентрацій введеної домішки. Цей ефект можна використати для зменшення ефективності каналювання імплантованих електрично активних домішок у процесі виготовлення мілких $p-n$ переходів, а також для оптимізації фазової рекристалізації імплантованих шарів при відпалах дефектів після імплантації.

У результаті використання УЗ під час іонної імплантації для надмілких $p^+ - n$ і $n^+ - p$ переходів досягнуто поліпшення електричних характеристик (ВАХ, вольт-ємнісних характеристик, напруги пробою тощо) та підвищення однорідності розподілу їх електрофізичних характеристик на площі пластини. Так, для МОН-транзисторів з надмілкими $p-n$ переходами зростає напруга пробою у 1,5–1,6 раза (рис. 3) і відповідно зменшується струм витоку у разі зворотного зміщення [4].

При створенні надвисокочастотних (> 10 ГГц) електронних та оптоелектронних приладів на основі гетероструктур типу $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ існує проблема механічних напружень і, відповідно, нестабільності параметрів. Потовщення плівки призводить до релаксації механічних напружень за рахунок генерації дислокацій невідповідності, концентрація яких досягає $\sim 10^8 - 10^{11}$ см^{-2} . Частина дислокацій проникає у плівку, що негативно позначається на характеристиках приладів. Один із методів розв'язання даної проблеми — імплантація атомів He з подальшим відпадом. Це супроводжується утворенням в об'ємі зразка бульбашок гелію і після генерації дислокацій компенсує механічні напруження у плівці. Використання *in situ* УЗ обробки плівок за імплантації йонів не дає можливості додатково зменшити механічні напруження у структурі $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$, ступінь релаксації яких сягає понад 80%. Таким чином, ми отримуємо малодфектні структури з великою товщиною SiGe-плівки та вмістом Ge до 30% [5]. Вважається, що основним механізмом УЗ дії є акустостимульоване впорядкування сітки дислокацій невідповідності, а також зростання ймовірності анігіляції проникаючих дислокацій.

За підвищеного інтересу науковців до нанорозмірних структур нині надзвичайно актуальними є нові технологічні мож-

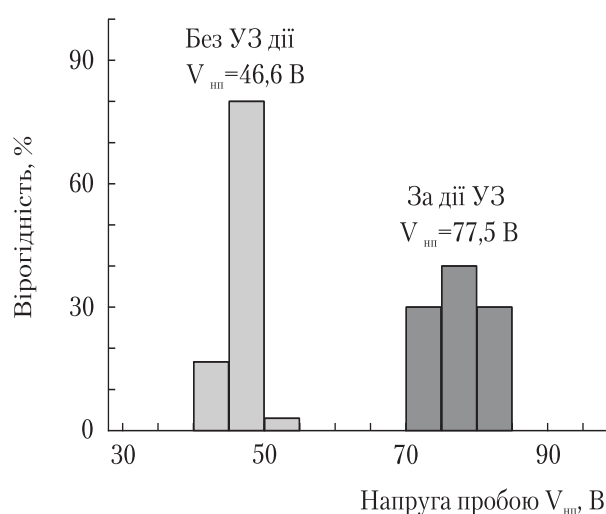


Рис. 3. Розподіл напруги пробою $V_{нп}$ при зворотному зміщенні для $p^+ - n$ переходів, сформованих без УЗ та з УЗ, відповідно

ливості керованого формування нанокристалів, особливо кремнію, в різних діелектричних матрицях (SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3). Застосування додаткової УЗ дії при імплантації йонами Si виявило важливий позитивний ефект впливу, зокрема, на люмінесцентні властивості наноструктур Si/SiO₂ [6]. Встановлено, що УЗ обробка кристалу *in situ* спричинює зсув максимуму фотолюмінесценції у короткохвильову ділянку і суттєво збільшує її інтенсивність. Цей ефект пояснюється тим, що УЗ дія стимулює утворення нанокристалів менших розмірів за одночасного зростання їхньої концентрації. Отже, застосування УЗ обробки *in situ* уможлиблює керування розмірами нанокластерів Si та їхніми люмінесцентними властивостями і може слугувати основою для розробки принципово нових технологічних методів акустостимульованої іонно-променевої інженерії формування нанокристалів кремнію (і не тільки його).

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ

Разом із дослідженням акустоїонних технологій успішно вивчають акусто-

електронні явища, що спостерігаються у процесі поширення поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) у діелектриках і напівпровідниках. Особливо перспективними є результати вивчення можливостей створення активних акустоелектронних пристроїв з керованими характеристиками на основі фізичних явищ, які виникають у процесі генерації, поширення і детектування ПАХ у шаруватих структурах типу напівпровідник–п'єзоелектрик, п'єзоелектрик–вакуум–діелектрик, п'єзоелектрик–фоточутливий напівпровідник тощо [8]. Результати досліджень таких структур можуть бути фундаментальною базою для створення акусто-, опто-, мікроелектронних пристроїв, сенсорів фізичних величин і газів з унікальними характеристиками, що особливо важливо для розвитку інформаційних систем якісно нового рівня.

Зокрема, використання структур з функціональних матеріалів, які поєднують у собі властивості напівпровідника, п'єзоелектрика і фотоелектрика, як, наприклад, CdS/LiNbO₃, відкриває можливості створення функціонально інтегрованих мікроелектронних пристроїв, що здатні виконувати складні операції сприйняття і обробки сигналів [9].

За успіхами пасивної акустоелектроніки, зокрема, впровадження пристроїв частотно-часової селекції у системи зв'язку і те-



Рис. 4. Сенсор надлишкового тиску

лекомунікацій, очікуються нові досягнення, пов'язані з розробками активних акустоелектронних пристроїв з керованими характеристиками. Це особливо виразно виявляється у такому перспективному науково-технічному напрямі, як сенсорика. Причому, що важливо, базовий елемент на ПАХ може бути основою для створення як сенсорів фізичних величин різного функціонального призначення (переміщень лінійного і кутового, тиску, зусилля, температури тощо), так і сенсорів газів.

Використання акустоелектронних ефектів, зокрема в сенсорах фізичних величин, сприяє досягненню унікальних метрологічних й експлуатаційних параметрів. Так, використання кутової залежності фазової швидкості ПАХ Релея в анізотропних п'єзоелектриках за безконтактного збудження відкрило можливість збільшення керованості основними характеристиками акустоелектронних пристроїв на ПАХ (зміни величин параметрів) приблизно в 6–8 разів порівняно з результатами, одержаними іншими авторами [10].

Додатковою і досить значною перевагою сенсорів з елементами на ПАХ є високий ступінь уніфікації конструктивно-технологічних рішень і порівняно легке їх сполучення з ЕОМ та мікропроцесорною технікою, що забезпечує розв'язання проблеми інтелектуалізації сенсорів. Одним із прикладів, які підтверджують успіхи реалізації такого підходу, є сенсор тиску, зображений на рис. 4.

Результати досліджень структури анізотропний п'єзоелектрик — шар повітря–діелектрик, яка реалізує явище кутової залежності ПАХ, стали підґрунтям для створення нового покоління керованих акустоелектронних пристроїв різного функціонального призначення — не тільки сенсорів фізичних величин, а й радіокомпонентів частотно-часової селекції з переналагоджуваними параметрами тощо [10]. Це дає змогу підвищити тактико-технічні характеристики систем

зв'язку, управління, радарів тощо. Суттєво, що для реалізації даного методу не потрібні високі технології і великі капіталовкладення, а в сучасних українських реаліях це особливо важливо для нашої держави.

Вражаючі перспективи акустoeлектронних методів у сенсоріці відкриваються за умови інтеграції досягнень різних напрямів функціональної електроніки, зокрема акусто- і молекулярної електроніки. Так, технологія Ленгмюра—Блоджетт (Л—Б) для формування моно- чи полімолекулярних пліткових структур на поверхні п'єзoeлектрика—звукoпроводу елемента на ПАХ дає змогу кардинально підвищити метрологічні характеристики та інтелектуалізувати сенсори газів. Перспективи такого підходу ґрунтуються на можливостях використання фізичних ефектів поширення ПАХ у п'єзoeлектриках, впливу на умови поширення фізико-хімічних процесів взаємодії тонких пліткових структур з компонентами газового середовища, що адекватно відображається у параметрах вихідного сигналу сенсора. Причому проблема чутливості і селективності сенсорів розв'язується головним чином завдяки рецепторним властивостям мономолекулярних пліткових Л—Б структур, а частотний вигляд вихідного сигналу сенсорів дає змогу легко сполучати їх з мікропроцесорною технікою і забезпечити інтелектуалізацію. Базову конструкцію такого сенсора схематично показано на рис. 5.

Таким чином, ефективність й універсальність акустoйонних і акустoeлектронних методів, пріоритети яких підтверджені патентами на винахід, можуть істотно вплинути на розвиток приладо- і машинобудування, а також інформаційних технологій. Є підстави вважати, що акустoйонні та акустoeлектронні технології можуть бути базовими для низки перспективних науково-технічних напрямів [11]. Назвемо їх.

Технологія тонких плівок. Синергетичне впорядкування нерівноважних структур,

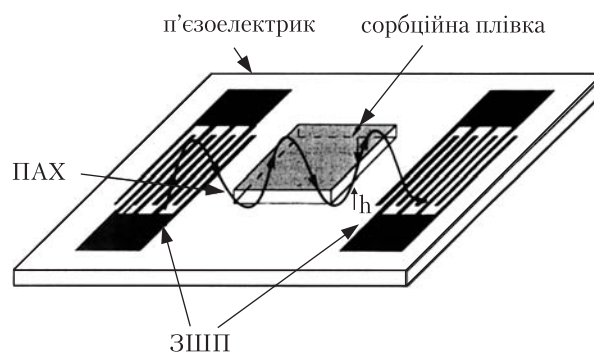


Рис. 5. Базова конструкція сенсора газу на основі елемента на ПАХ

стимульоване акустoйонною дією; модифікація властивостей границь поділу фаз; збільшення адгезії, перемішування фаз, створення нерівноважних умов і стимулювання фазових переходів.

Нанoeлектроніка. Формування нанорозмірних об'єктів, перспективних для систем оптоелектроніки, обробки оптичної інформації, синтез нанокластерів за рахунок стимульованого їх зародження під дією УЗ; формування вбудованих у матрицю нанорозмірних шарів.

Функціональна мікроелектроніка, зокрема акусто-, оптоелектроніка, акустooптика. Створення активних акустoeлектронних пристроїв нового покоління з керованими характеристиками для виконання складних функцій сприйняття й обробки інформації, сенсорів фізичних величин та сенсорів газів нового покоління.

Дослідження в цих науково-технічних напрямах інтенсивно ведуть провідні університети і фірми США, Великої Британії, Німеччини, Італії, Росії, Японії та інших країн. Деякі з названих держав фінансують ці роботи в рамках національних програм або на замовлення оборонних відомств. Це зумовлено обґрунтованими прогнозами отримання значних практичних результатів щодо створення нового покоління приладів для забезпечення інформаційних систем.

1. Krüger D., Romanyuk B., Olikh Ya. et al. Method of Fabricating Ion-Implanted Doping Layers in Semiconductor Materials and Integrated Circuits. US Patent No. 6358823B, March 19, 2002.
2. Romanyuk B., Melnik V., Olikh Ya. et al. Modification of the Si amorphization process by in-situ ultrasonic treatments during ion implantation // *Semicond. Sci. & Technology*. – 2001. – **16**, P. 397.
3. Krüger D., Romanyuk B., Olikh Ya. et al. Influence of in-situ ultrasonic treatment during ion implantation on amorphization and junction formation in Silicon // *J. Vacuum Sci. & Technology*. – 2002. – **B 20**, No 4. – P. 1448–1451.
4. Melnik V.P., Olikh Ya.M., Popov V.G. et al. Characteristics of silicon p-n junction formed by ion implantation with in-situ ultrasound treatment // *Material Science and Engineering*. – 2005. – **V. 124–125**. – P. 327–330.
5. Romanyuk B., Klado V., Olikh Ya. et al. Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in-situ ultrasonic treatments // *Mater. Sci. in Semicond. Process*. – 2005. – **8**, No 4. – P. 171–175.
6. Martinyuk O., Olikh Ya., Romanyuk B. et al. SiO₂ and Si₃N₄ phase formation by ion implantation with in-situ ultrasound treatment // *Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment* // Ed. D. Flandre et al, Kluwer: Academic Publ., 2005. – P. 97–102.
7. Olikh Ja. M., Olikh O. Ja. Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2004. – No 1. – P. 19–29.
8. Лепіх Я.І. Фізичні явища в структурах напівпровідник–п'єзоелектрик та можливості створення нового класу пристроїв на їх основі // *Журн. фіз. досліджень*. – 2003. – **7**, № 2. – С. 127–131.
9. Lepikh Ya. I. The sensor of infra-red radiation sources temperature // *7th International Conference on Infrared Sensors Systems. Proceedings. (14–16 May, 2002) / 2002*. – Fr-furt, Germany. – P. 179–181.
10. Lepikh Ya. I. The state and prospects of the sensor electronics based on acoustoelectronic phenomena // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2004. – No 1. – P. 45–58.
11. Лепіх Я.І., Мачулін В.Ф., Оліх Я.М., Романюк Б.М. Акустоелектронні та акустостійонні технології: стан і перспективи // *Всеукраїнський з'їзд «Фізика в Україні»*. Тез. доп. (Одеса, 3–6 жовтня, 2005) / 2005. – С. 31–32.

В. Мачулін, Я. Лепіх, Я. Оліх, Б. Романюк

АКУСТОЙОННІ ТА АКУСТОЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ

Резюме

Представлено новий підхід до розв'язання проблеми керування параметрами напівпровідникових матеріалів у рамках кремнієвої технології виготовлення КМОН-приладів, а також проблеми управління характеристиками активних акустоелектронних пристроїв і створення на їх основі датчиків нового покоління. Він полягає у використанні ультразвукової обробки напівпровідникових пластин під час імплантації (акустостійонні технології) та вивченні фізичних явищ, які виникають у процесі поширення акустичних хвиль в анізотропних п'єзоелектриках (акустоелектронні технології). Ефективність та універсальність акустостійонних і акустоелектронних методів, пріоритети яких підтверджені патентами на винахід, можуть мати суттєве значення для розвитку приладо-інформаційних технологій і машинобудування, а також можуть бути базовими для ряду таких перспективних науково-технічних напрямів, як технологія тонких плівок, наноелектроніка, функціональна мікроелектроніка, оптоелектроніка.

V. Machulin, Ya. Lepikh, Ya. Olikh, B. Romanyuk

ACOUSTIC-ION AND ACOUSTIC-ELECTRON TECHNOLOGIES

Summary

The new approach to problem solution of semi-conductor material control within the frame of silicon technology of KMON-devices manufacturing is presented as well as to active acoustic-electron devices characteristic control problem and creation of new generation gauges based on these devices. The approach is to use ultrasonic treatment of semi-conduct plates during implantation (acoustic-ion technologies) and to investigate physical phenomena that occur during acoustic waves spread in anisotropic piezoelectrics (acoustic-electron technologies). Effectiveness and universality of acoustic-ion and acoustic-electron methods which priorities are proved by patents for invention can play an important role for instrument-making industry, information technologies, machine building, as well as become the basis of such advance scientific and engineering trends as thin film technology, nanoelectronics, functional microelectronics, optoelectronics.