

SENSOR AND INFORMATION SYSTEMS

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

УДК 621.315.592

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ІНТЕГРАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ НА ОСНОВІ НАНОСТРУКТУР КРЕМНІЮ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

А. О. Дружинін¹, І. Т. Когут², О. Ю. Ховерко¹, В. І. Голота², Ю. М. Ховерко¹

¹Національний університет “Львівська політехніка”

79013, Львів, вул. С.Бандери, 12, ☎(032) 258-26-27

²Прикарпатський університет ім. В. Стефаника

druzh@polynet.lviv.ua

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ІНТЕГРАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ НА ОСНОВІ НАНОСТРУКТУР КРЕМНІЮ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

А. О. Дружинін, І. Т. Когут, О. Ю. Ховерко, В. І. Голота, Ю. М. Ховерко

Анотація. В роботі розглянуто чутливий елемент акселерометра, що виконаний з використанням суміщеної технології створення структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних нанокристалів кремнію. На його основі розроблено малоінерційний, швидкодіючий, високочутливий до прискорення і переміщень пристрій із субмікрометровими і нанометровими топологічними розмірами. Це дало можливість реалізувати як дискретний прилад, так і елемент зінтегрованих наноелектромеханічних систем зі структурою кремній-на-ізоляторі, який забезпечує контроль переміщення з точністю 200 нм.

Ключові слова: акселерометр, полікремній, структура кремній-на-ізоляторі, травлення, наноелектромеханічна система

ПОЛУПРОВІДНИКОВИЙ ІНТЕГРАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУР КРЕМНІЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

А. А. Дружинин, И. Т. Когут, А. Ю. Ховерко, В. И. Голота, Ю. Н. Ховерко

Аннотация. В работе рассмотрен чувствительный элемент акселерометра, который выполнен с использованием совмещенной технологии создания структур кремний-на-изоляторе и нитевидных нанокристаллов кремния. На его основе разработан малоинерционный, быстродействующий, высокочувствительный к ускорению и перемещений устройство с субмикрометровыми и нанометровыми топологическими размерами. Это дало возможность реализовать как дискрет-

ний прибор, так и элемент интегрированных наноэлектромеханических систем со структурой кремний-на-изоляторе, который обеспечивает контроль перемещения с точностью 200 нм.

Ключевые слова: акселерометр, поликремний, структура кремний-на-изоляторе, травление, наноэлектромеханическая система

SEMICONDUCTOR INTEGRATED ELEMENTS BASED ON NANOSTRUCTURES SILICON FOR INFORMATION SYSTEMS

A. A. Druzhinin, I. T. Kogut, A. Yu. Khoverko, V. I. Golota, Yu. M. Khoverko

Abstract. In this paper we consider the accelerometer sensor, which is made using the combined technology of silicon-on-insulator and silicon nanowires. On its basis a fast-response, high-speed, highly sensitive to acceleration and displacement a device was developed with submicron and topological nanometer dimensions. This made it possible to implement as a discrete device or element of nanoelectromechanical systems integrated with the structure of silicon-on-insulator, which provides control of movement with an accuracy of 200 nm

Keywords: accelerometer, polysilicon, structure of silicon-on-insulator, etching, NEMS

Вступ

Одним із перспективних напрямків розвитку сучасної твердотільної електроніки є розроблення і використання наноелектромеханічних систем (НЕМС), які є результатом злиття технологій і конструкцій чутливих, актюаторних елементів та схем перетворення інформації від них на одному або декількох кристалах з електричними, оптичними або радіозв'язками [1-4], так звані пристрої More than Moore. Пристрої More than Moore являють собою комплекс систем на кристалі з наступними варіантами зінтегрованих елементів: КМОН-логіка, вбудована оперативна пам'ять, аналогові інтерфейси, незалежна пам'ять, процесорні мікроядра МЕМС, НЕМС, сенсори. Зінтегровані системи цього типу відкривають нові перспективи для систем безпеки (датчики руху, системи сигналізації) і комунікації (бездротові системи зв'язку, мобільні системи), медичного обладнання, засобів розумного будинку (інтелектуальні системи управління: клімат-контроль, управління освітленням і електро-живленням, прибудинкова інфраструктура) та енергетики (альтернативні методи отримання енергії) та ін. З цього приводу видається актуальним розвиток напряму More than Moore, що вмотивовано новими технологічними можливостями і необмеженим потенціалом практичного досвіду, який зосереджено на створенні великої кількості мікро-і наноелектронних систем. У

той же час розвиток мікроелектроніки і перспективи наноелектроніки, суттєво збільшені сучасні можливості мікропроцесорної техніки і особливості її використання в високоефективних інформаційних (інтелектуальних) системах вимагають реалізації нових підходів до створення первинних вимірювальних перетворювачів, які забезпечують перетворення контрольованої величини в зручний для використання сигнал. На сьогодні в мікро- і наноелектроніці широко використовуються шари полікристалічного кремнію на поверхні окисленої кремнійової пластини (КНІ-структури). Такі шари формуються, як правило, хімічним осадженням з газової фази [5]. Використання КНІ-структур відкриває широкі перспективи для створення високочутливих приладів мікроелектроніки, а в поєднанні з прийомами і методами нанотехнологій дає можливість створити новий клас пристроїв з розширеними функціональними можливостями, які за своїми характеристиками перевищують існуючі аналоги [6-9]. В свою чергу існують багато методів вирощування наноструктур, зокрема, молекулярно-променева епітаксія, каталітичний ріст за участю лазера, вирощування з надкритичної фази рідкого розчину, лазерна абляція чи просте випаровування [10-13]. Проте ці методи є енергозатратними і дорогими. Тому використання дешевих технологій одержання наноструктур Si є однією з важливих проблем

у розвитку нанотехнологій для їх подальшого застосування в наноелектромеханічних пристроях. Однією з таких технологій є використання методу хімічного травлення та хімічного парового осадження, що вже тривалий час сумісний з технологією виготовлення приладів мікро- і наноелектроніки [14–22].

Тому метою роботи є створення чутливого елемента акселерометра, використовуючи сучасні ресурсозберігаючі методи виготовлення мікро- і наноструктур кремнію.

Методика створення чутливого елемента акселерометра

В основі технологічного процесу створення чутливого елемента акселерометра на основі наноструктур кремнію становлять процеси, характерні для технології зінтегрованих схем (дифузійне або іонне легування, окиснення, фотолітографія, вакуумна металізація, різні типи очистки і термообробки і т.д.). Разом з тим, використовуються процеси, які не є типовими в напівпровідниковій технології. Насамперед до таких необхідно віднести анізотропне і ізотропне хімічне профілювання, вирощування нанооб'єктів кремнію методом ХТР.

На рис.1 наведено схематичне зображення чутливого елемента акселерометра на основі наноструктур кремнію.

Основні процеси формування чутливого елемента акселерометра наступні:

- формування нанооб'єктів кремнію (чутливого вістря нерухомого електрода, що слугує емісійним) методом хімічного парового осадження;
- піролітичне окиснення (стоп-шар при анізотропному та ізотропному витравлюванні порожнини);
- формування вихідної структури кремній на ізоляторі методом мікрозонної лазерної рекристалізації полікремнію.
- іонна імплантація бору в шар полікремнію (для створення необхідного рівня концентрації полікристалічного рухомого електрода);
- формування порожнини акселерометра і металізація електродів.

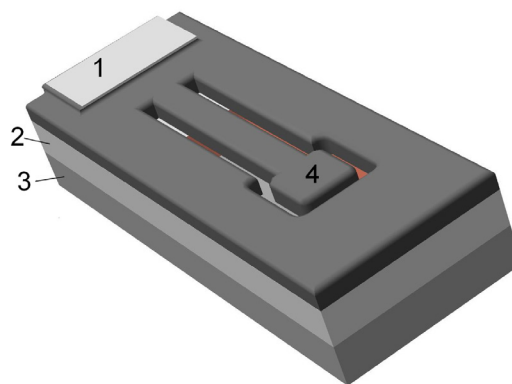


Рис. 1. Схематичне зображення чутливого елемента акселерометра на основі наноструктур кремнію: 1–алюмінійові контакти, 2– шар SiO_2 , 3– кремнійова підкладка, 4– рухомий електрод.

Всі ці процеси є важливими і в значній мірі визначають метрологічні характеристики готових приладів. Зупинимось на основних процесах, що були використані під час виготовлення чутливого елемента акселерометра на основі наноструктур кремнію.

Формування нерухомого електрода.

Для формування нерухомого електрода було досліджено процеси вирощування нанооб'єктів Si на кремнійову підкладку орієнтації (111). Для цього було осаджено плівки золота різної товщини – від 4 до 10 нм. Для одержання рівномірного розподілу золота у кристалах проводився відпал зразків протягом 30 хв за температури 600 °С з наступним охолодженням з швидкістю близько 3 град/хв. Після термообробки підкладок відбулась коагуляція золота у краплі. Середній діаметр крапель Si–Au істотно залежить від товщини осадженої плівки, і зменшується від 100 до 40 нм зі зменшенням товщини плівки від 10 до 4 нм. Після проведення високотемпературного відпалу пластини і коагуляції напиленого шару у краплі отримуємо пластину для подальшого росту вістря нерухомого електрода методом хімічного парового осадження. Вирощування Si проводили на кремнійових підкладках з різною товщиною золотої плівки – 10 нм та 4 нм. Аналіз ростових експериментів проводили з використанням методів електронної та атомно-силової мікроскопії. Для забезпечення ре-

гулярності утворених наноб'єктів [17,18] за допомогою шаблону сформовано золоті комірки (рис. 2), на кожній з яких отримано масив п'єдесталів, які в подальшому використовувалися для утворення вістря нерухомого електроду Si.

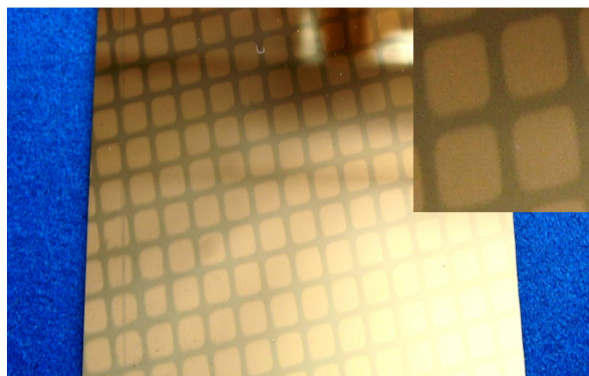


Рис. 2. Пластина з напиленою плівкою та сформованими комірками.

У результаті проведених експериментів [19-22] на пластині кремнію утворився масив п'єдесталів Si, середній розмір яких зображено на (рис. 3). Розміри емісійних електродів, згідно яких проводився розрахунок автоемісії становив $\sim 1,8$ мкм.

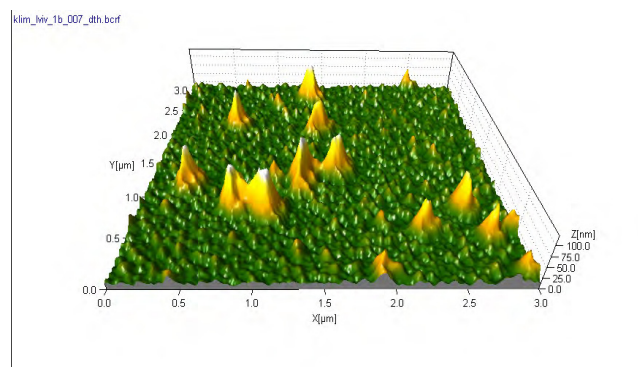


Рис. 3. АСМ зображення середнього розміру п'єдесталів на Si підкладці з плівкою золота товщиною 10 нм.

Утворення порожнини акселерометра.

Для створення герметизованих порожнин, рухомих консолей, електродів, балок тощо, а також враховуючи тенденції зменшення розмірів елементів до нанометрових, було проведено піролітичне окислення сформованих наноструктур (кремнієва підкладка з вирощеними п'єдесталами кремнію) до товщини, яка

повністю запобігала захисту чутливих емісійних електродів при подальших технологічних процесах і становила 2–3 мкм.

Формування рухомого електрода.

В основі формування рухомого електрода акселерометра покладено лазерну рекристалізацію полікремнію як методу отримання досконалих напівпровідникових шарів в структурах кремній-на-ізоляторі, що використовувалась для створення різноманітних сенсорів фізичних величин [23,24]. Для цього була проведена відповідна попередня підготовка вихідних зразків. На сформованих окиснених пластинах кремнію з газової фази в реакторі пониженого тиску при температурі 625°C осаджувались шари полікремнію товщиною 0,5 мкм. Для контролю за процесами зародження і росту зерен під час мікрозонної рекристалізації на етапі формування КНІ-структур було передбачено застосування способу селективного нагрівання матеріалів для створення заданого температурного профілю в зоні термічного впливу випромінювання [24].

Для цього на полікремнієвий шар додатково осаджувались плівка SiO_2 товщиною 0,75 мкм та створювалися смуги Si_3N_4 шириною 5 мкм з кроком 30 мкм, як зображено на рис.4. В результаті проведення лазерної рекристалізації отримані монокристалічні блоки з середнім розмірів кристалітів 20×500 мкм, що використовуються в подальшому як рухомі частини акселерометра.

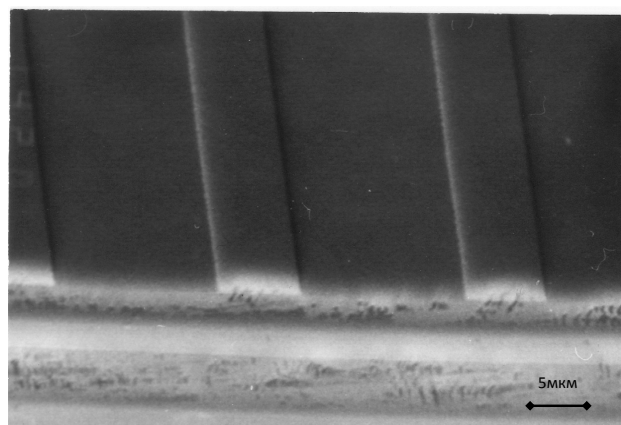


Рис. 4. Фотографія перерізу КНІ-структури.

Кінцевим етапом формування чутливого елемента акселерометра є створення топологічного рисунку на поверхні КНІ-структури з

подальшим проведенням процесів мікропрофілювання шляхом комплексного застосування анізотропного та ізотропного травлення, які можна окреслити наступним:

- ізотропне плазмохімічне травлення незамащованих ділянок КНІ-структури на глибину 1,5 мкм;

- повторне осадження шару Si_3N_4 товщиною 0,02 мкм, осадження шару SiO_2 товщиною 0,1 мкм та формування фотолітографією і плазмохімічним травленням маскуючих ділянок на горизонтальній поверхні КНІ-структури;

- анізотропне плазмохімічне травлення піrolітичного SiO_2 на дні протравлених щілин в КНІ-структурі;

- анізотропне плазмохімічне травлення SiO_2 для збільшення висоти протравлених щілин в кремнієвій пластині на 0,5 мкм;

- ізотропне травлення кремнію на глибину 0,5 мкм для створення об'ємних заглиблених порожнин під поверхнею КНІ-структури.

Схематичний зображення переріз чутливого елемента акселерометра зображено на рис. 5.

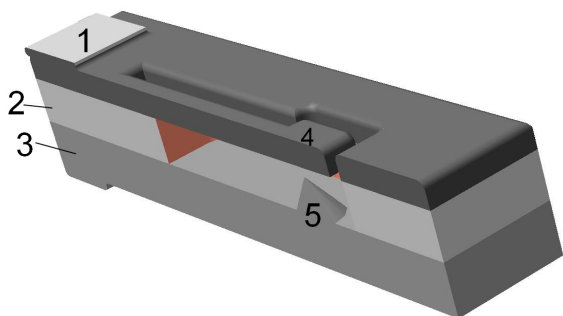


Рис. 5. Переріз чутливого елемента акселерометра: 1–алюмінієві контакти, 2– шар SiO_2 , 3– кремнієва підкладка, 4–рухомий електрод, 5- нерухомий електрод.

Таким чином, під час формування рухомого електрода акселерометра використовуються основні технологічні процеси, що лежать в основі виготовлення зінтегованих схем.

Експериментальні результати

На рис.6 зображено фотографію чутливого елемента акселерометра в інтегральному виконанні.

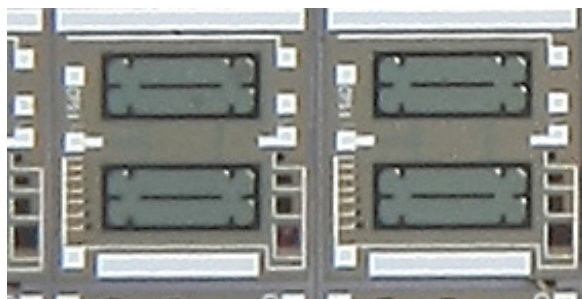


Рис. 6. Мікрофотографія планарної сторони чутливого елемента акселерометра.

Чутливий елемент акселерометра функціонує наступним чином. При подачі різниці потенціалів між рухомим і нерухомим електродом протікає початковий струм автоемісії (рис.7а). При зміщенні рухомої маси електрода (рис.7б) збільшується відстань між вістрями, в результаті цього зменшується напруженість електричного поля у порожнині і, відповідно, струм автоемісії, який реєструється вимірювальними приладом, або схемою фіксації. При різниці потенціалів 1000В між електродами, радіусі кривизни вістря електродів 5 нм, розраховані значення напруженості електричного поля, автоемісійного струму, при заданих зміщеннях рухомого елемента і наведені в табл.1.

Враховуючи сильну залежність автоемісійного струму від величини переміщення, про що свідчать результати наведені в табл.1, та дуже малу інерційність рухомого електрода, запропоновані елементи можуть бути основою для створення надчутливих акселерометрів з реєстрацією змін емісійних струмів як в дискретному виконанні, так і для створення елементів акселерометрів в складі наноелектромеханічних систем [25].

Таблиця 1
Струм автоемісії при зміщеннях рухомого електрода

Зміщення, мкм	Напруженість поля, В/см	Струм автоемісії, А
0	$4,6 \times 10^7$	$1,5 \times 10^{-6}$
0,2	$4,2 \times 10^7$	$3,2 \times 10^{-7}$
0,4	$3,8 \times 10^7$	$7,2 \times 10^{-8}$

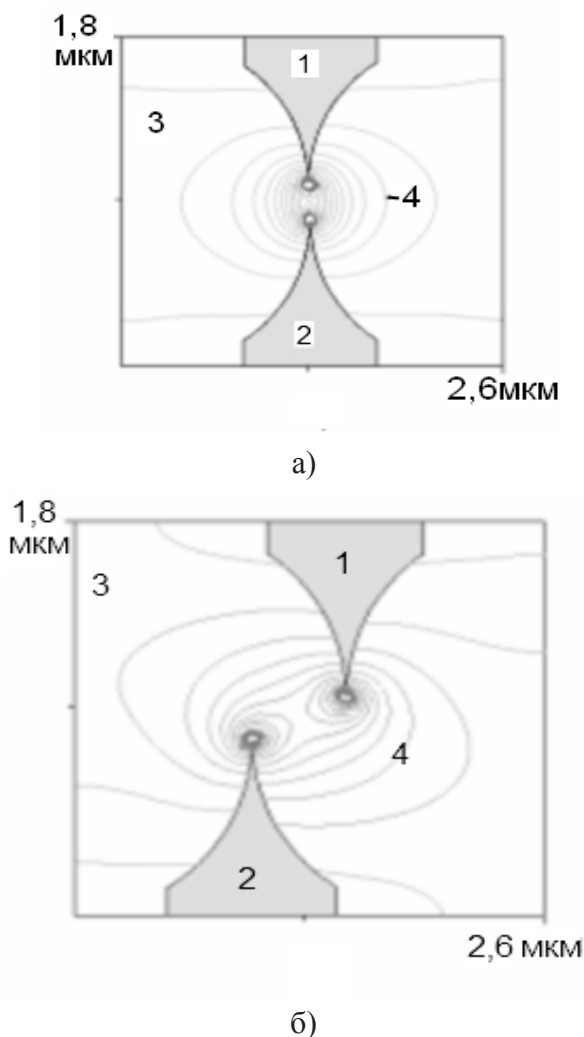


Рис. 7. Принцип дії акселерометра на основі наноструктур кремнію: 1-рухомий електрод, 2-нерухомий електрод, 3 – мікропорожнина; 4 – лінії електричного поля.

Необхідно зауважити, що конструктивний ізоляційний шар SiO_2 автоемісійного чутливого елемента акселерометра витримує напруженості електричного поля до 1000 В/мкм, тому є придатним для високовольтних використань в пристроях та зінтегрованих наноелектромеханічних системах.

ВИСНОВКИ

В результаті комплексних досліджень розроблено чутливий елемент акселерометра на основі наноструктур кремнію за суміщеною технологіями і запропонована його конструкція, що дозволяє підвищити параметри чутливості, стійкості до зовнішніх впливів електромагнітних полів, забезпечити його малоінерційність. Пристрій є придатним для створення

як дискретних приладів, так і наноелектромеханічних систем. На основі експериментальних досліджень встановлено, що зміщення між електродами акселерометра призводить до зміни струму автоемісії на два порядки. Чутливий елемент акселерометра може мати застосування як у промисловості, так і в науково-дослідних роботах, особливо, зі створення і експлуатації пристроїв реєстрації прискорень в умовах високого вакууму, в аерокосмічних застосуваннях, тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. J.Wilson. Sensor Technology Handbook/ Editor-in-Chief J..S.Wilson, Elsevier Inc.2005.– 703p.
2. Y. Cui, C.M. Lieber, Functional Nanoscale Electronic Devices Assembled Using Silicon Nanowire Building Blocks, Science, 291(5505).–2001.–p. 851–853.
3. E.Sicard, S. Delmas Bendhia. Advanced CMOS cell design. McGraw-Hill, New-York. – 2007. – 383 c.
4. K. Bernstein, N. Rochler. SOI circuit design. Kluwer Academic Press, New York.– 2002.–321 c.
5. Collinge J.-P .Silicon-on-Insulator Technology: materials to VLSI / Edition, by Kluwer Academic Publishers.– 1997.– 609 p.
6. H.Rongrui and Y. Peidong. Giant piezoresistance effect in silicon nanowires. Nature nanotechnology .– VOL 1.– October 2006. Letters.–2006.– pp.42-46.
7. O.V.Naumova, I.V.Antonova, V.P.Popov, Yu.V.Nastaushev, T.A.Gavrilova, I.V.Litvin, A.I.Aseev. Modification of silicon-on-insulator structures under nano-scale device fabrication // Microelectronic Engineering.–2003.–Vol.69, Issues 2-4.–P.168-172.
8. V. I. Turchanikov, A. N. Nazarov, V. S. Lysenko, Josep Carreras, B. Garrido: Charge storage peculiarities in poly-Si-SiO₂-Si memory devices with Si nanocrystals rich SiO₂. Microelectronics Reliability 45(5-6).–2005.– p.903-906.
9. O.V.Naumova, V.P.Popov, A.I.Aseev,

- Yu.D.Ivanov, A.I.Archakov Silicon-on-insulator nanowire transistor for medical biosensors// EuroSOI International conference.– Goteborg.–2009.–P.69-70.
10. C.Y.Lee, T.Y.Tseng, S.Y.Li and P. Lin. Growth of zing oxide nanowires on silicon (100) // Tamkang Journal of Science and Engineering, 2003. – Vol.6, No. 2.– pp. 127-132.
11. Y.F.Zhang, T Y.H.ang, N.Wang, D.P.Yu, C.S.Lee, B I.ello, S.T.Lee Silicon nanowires prepared by laser ablation at high temperature// Appl. Phys. Lett. 1998. – Vol. 72. –P. 15.
12. Y.Wu, R.Fan, and P.Yang. Block-by-block growth of single-crystalline Si/SiGe superlattice nanowires. Nano Letters, 2002. – Vol. 2, N2. – P. 83-86.
13. C.Deng, W.Sigmon, G.K Giust., J.C.Wu, M.N. Wybourne. Novel scheme to fabricate SiGe nanowires using pulsed ultraviolet laser induced epitaxy // J. Vac. Sci. Technol. A 14(3), May/June 1996.– p.1860.
14. I.Zubel, M.Kramkowska. The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions// Sensors&Actuators.–A93.–2001.– P.138–147.
15. M.J. Hampden-Smith. Chemical Vapour Deposition of Metals. Part 1. An Overview of CVD Processes / M.J. Hampden-Smith, T.T. Kodas // Journal Chemical Vapour Deposition. – 1995. – № 1. – P. 8–23.
16. A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, S.I. Nichkalo. Growth of Si wires array by CVD method // E-MRS 2009 Spring Meeting, Strasbourg (France), June 8–12, 2009: Book of Abstracts. Symposium: I Advanced Silicon materials research for electronic and photovoltaic applications. – 2009. – P. 155.
17. A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, S.I. Nichkalo. Peculiarities of Si nanowires growth // Materials of International Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-2)”, September 27–30, 2009, Uzhgorod, Ukraine. – 2009. – P. 58.
18. А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, С.І. Нічкало. Вирощування нано- та мікродротин кремнію методом CVD та можливість їх сенсорних застосувань // Наук.-техн. збірн. „Електроніка и связь”. – 2009. – № 2–3. – С. 56–60.
19. А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, С.І. Нічкало Вирощування нанорозмірних кристалів Si методом газозафазової епітаксії // Вісник НУ „Львівська політехніка” “Електроніка”. – 2009. – № 646. – С. 11–16.
20. А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, С.І. Нічкало. Особливості створення нанорозмірних кристалів кремнію // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10, № 4. – С. 777–780.
21. А.А. Дружинин, И.П. Островский, Ю.Н. Ховерко, С.И. Ничкало. Получение нитевидных нанокристаллов Si и SiGe // 36. науч. праць „Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології”. – 2011. – Т. 9. – С. 925–931.
22. Патент № 63926 Україна, МПК H01L 21/00, C30B 29/00. Спосіб одержання масивів нанокристалів кремнію / А.О.Дружинін, І.П.Островський, С.І.Нічкало, Ю.М.Ховерко; Національний університет “Львівська політехніка” – Бюл. № 20/2011.– 3 с.
23. A Druzhinin, E.Lavitska, I.Maryamova, Y.Khoverko. Laser recrystallized SOI layers for sensor applications at cryogenic temperatures. F. Balestra et al. (eds.) Progress in SOI structures and Devices Operating at Extreme Conditions. Kluwer Acad. Publishers. Printed in the Netherlands. – 2002. – P. 233-237.
24. Anatoly Druzhinin, Inna Maryamova, Igor Kogut, Yuriy Khoverko Polysilicon on Insulator Structures for Sensor Application at Electron Irradiation & Magnetic Fields // Advanced Materials

Research. – 2011. – Vol. 276. – P. 109–116.
25. Патент № 62951 Україна, МПК H01L 27/00. Автоемісійний чутливий елемент акселерометра /

А.О.Дружинін, І.Т.Когут, В.І.Голота, Ю.М.Ховерко; Національний університет «Львівська політехніка» – № u201101326; Заявл. 07.02.2011; Опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. – 3 с.