

УДК 535.5; 535.347

О. О. ОЛІЙНИК

## МОДУЛЯЦІЙНО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СТРУКТУРАХ SI-AL

В роботі описується дослідження мікроелектронного сенсора тиску, роль мембрани якого виконує кремнієва пластина з напиленими на неї алюмінієвими провідниками та тензорезистором. Показано, що в початковому стані на поверхні мембрани існує розподіл механічних напружень, який спричинений геометрією сенсора, а також є наслідком наплення алюмінієвих провідників та тензорезистора. Приведені результати теоретичних досліджень, на відміну від існуючих ідеалізованих, дозволяють безпосередньо вимірювати та розраховувати початкові параметри механічних напружень кремнієвих структур, а не приймати їх значення за нуль, що дозволяє поліпшити, таким чином, метрологічні параметри сенсорів.

**Ключові слова:** модуляційна поляриметрия, механічні напруження в кремнії, механічні напруження в Si-Al.

В работе описывается исследование микроэлектронного сенсора давления, мембрана которого, выполнена с кремниевой пластины с напыленными на нее алюминиевыми проводниками и тензорезистором. Показано, что в начальном состоянии на поверхности мембраны существует распределение механических напряжений, которые вызваны геометрией сенсора, а также являются следствием напыления алюминиевых проводников и тензорезистора. Приведены результаты теоретических исследований, которые в отличие от существующих идеализированных, позволяют непосредственно измерять и рассчитывать начальные параметры механических напряжений кремниевых структур, а не принимать их нулевые значения, что позволяет улучшить, таким образом, метрологические параметры сенсоров.

**Ключевые слова:** модуляционная поляриметрия, механические напряжения в кремнии, механические напряжения в Si-Al.

The paper describes the research of microelectronic pressure sensor membrane which is made of a silicon wafer with deposited aluminum conductors and strain gage. It is shown that there is a distribution of mechanical stresses on the membrane surface in the initial state, which are caused by the geometry of the sensor as well as aluminum conductors and strain gage deposition. The results of theoretical research, unlike idealized present, allow to measure directly and calculate the initial parameters of silicon structure stresses, and do not give them zero value. It can improve metrological parameters of sensors. Modulation polarization technique for stress measurement using reflected polarized radiation is described. Experimental results demonstrate a sufficient sensitivity of the measuring equipment to membrane internal stress redistribution caused by heating after operation power is applied to the integral pressure sensor.

**Keywords:** modulation polarimetry, mechanical stress in the silicon, the mechanical stresses in the Si-Al.

**Вступ.** В мікроелектромеханічних (MEMS) та мікроелектронних системах використовують геометричну форму і властивості тонких плівок для керування параметрами приладів, виготовлених на їх основі. Виникаючі неконтрольовані механічні напруження можуть спричинити виникнення невідтворюваних механічних характеристик приладів, до зміни форми пристрою, а також до непередбачуваних термомеханічним деформаціям. Крім цього, механічні напруження, які формуються в процесі наплення, осадження та обробки плівок, можуть призводити до розтріскування та відшаруванню плівок від підкладки [1].

При формуванні мікроелектронних структур мембранного типу, а також структур, які виконані у вигляді плівки без підкладки варто враховувати механічні напруження та форму отриманих структур. За ра-

хунок підбору значень механічних напружень можливо керувати геометрією мембрани і створювати 3D-структури для мікроелектронних систем. Зменшення механічних напружень мембрани дозволяє зменшити її жорсткість, а як результат – збільшити її чутливість збережені конструкцій та малих геометричних розмірів.

В залежності від причин виникнення механічні напруження в плівках (мембранах) можуть бути термічними або термомеханічними, фазовими, фізико-хімічними, структурними [2, 3].

Механічні напруження також використовуються для формування мікроструктур під дією стискаючих напружень (рис. 1), де підбір параметрів кристалічної ґратки епітаксialних плівок дозволяє створювати тривимірні мікро- та наноструктури на основі плівок [4]:

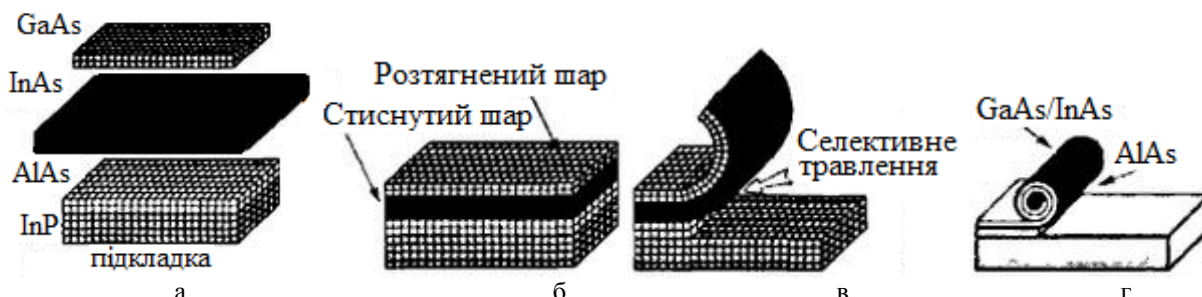


Рис. 1 – Схема формування нанотрубок: а – шари з різними постійними ґратки у вільному стані; б – шари, вирошені на підкладці, які повторюють кристалічну ґратку підкладки; в – вигин напруженої структури при селективному травленні, г – утворення нанотрубки [4]

Розвиток методів вимірювань механічних напружень обумовлено необхідністю контролювати величину механічних напружень в плівках різних матеріалів. Вимірювання механічних напружень може здійснюватись як в процесі отримання плівки, так і після його завершення. Вибір методу вимірювання визначається типом плівки, матеріалом підкладки та конструктивними особливостями.

Існуючі методи вимірювання механічних напружень можна класифікувати в залежності від застосованого фізичного явища: дифракційні методи (рентгєнівська або електронна), механічні (вимірювання деформації підкладки), електричні методи (вимірювання провідності, ємності та інших параметрів тонких плівок) [5]. Реєстрація деформації зазвичай здійснюється оптичними інтерференційними методами за умови достатньої деформації мембрани. Недоліком механічних методів є неможливість розділення механічних напружень кристалів і аморфних фаз, а рентгєнівська дифракція дає інформацію лише про напруження в кристалічній фазі [6]. Основні методи для дослідження кристалічних плівок є: растрова електронна мікроскопія, просвітлююча електронна мікроскопія, резерфордівське зворотне розсіювання, еліпсометрія, ПЧ-Фур'є спектроскопія, атомно-силова мікроскопія, спектроскопія комбінаційного розсіювання світла та інші [7].

**Постановка проблеми.** Проблемам вимірювання механічних напружень в твердих тілах присвячено безліч наукових публікацій, але відносно незначна їх частина присвячена прищезійним та надчутливим методам вимірювань, які дозволяють вимірювати такі механічні напруження, які не викликають деформації підкладки чи мембрани. В роботі [8] модуляційно-поляризаційний метод реєстрації механічних напружень в поверхневій плівці (порушений шар в процесі полірування кристалічного кварцу) демонструє високу виявну здатність завдяки фотопружному ефекту. Описаний взаємозв'язок між параметрами лазерного випромінювання, величиною приповерхневих механічних напружень та деформацією підкладки і плівки підходить лише для оптичнопрозорих підкладок, наприклад: кристалічного кварцу (елементи оптоелектроніки), сапфіру (елементи електроніки, оптики), полікарбонату (CD-DVD-BluRay диски), ніобату літїю (прилади на поверхневих акустичних хвилях в електроніці) та ін. У випадку підкладки з оптично непрозорих матеріалів: Si, Ge, GaAs, SiC, металеві плівки та ін., описаний метод не підходить і потрібно зібрати оптичну схему установки, яка реєструє оптичну (механічну) анізотропію не у пройдену крізь зразок випромінюванні, а у відбитому. Така оптична схема установки побудована за принципом інтерферометра Майкельсона, у якому додатково розташовано модулятор стану поляризації (рис. 2).

У випадку дослідження матеріалів з великим значенням показника поглинання відбита хвиля формується в приповерхневому шарі кристалу співрозмірному довжині поглинання. Якщо кристал хоча б на довжині поглинання має діелектричну анізотропію, то стан поляризації падаючого випромінювання зміниться після взаємодії зі зразком.

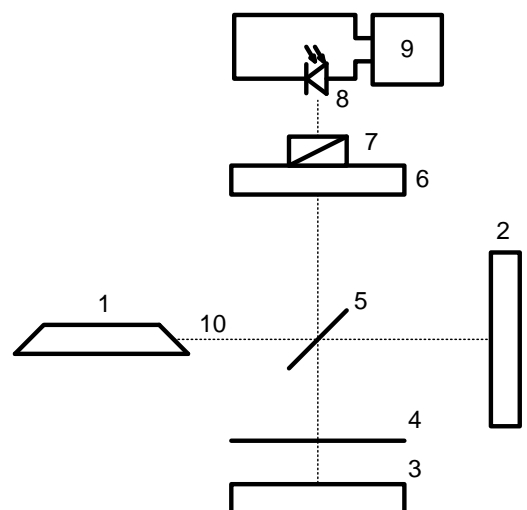


Рис. 2 – Оптична схема приладу для вимірювання поверхневих механічних напружень: 1 – лазер, 2 – зразок, 3 – дзеркало, 4 – чвертьхвильова фазова пластинка, 5 – напівпрозоре дзеркало, 6 – фотопружний модулятор, 7 – поляризатор, 8 – фотоприймач, 9 – синхронно-фазовий нановольтметр, 10 – поляризатор

Отже існує гостра необхідність у розробці нових методик вимірювання механічних напружень в елементах електроніки та техніки, зокрема в сенсорах тиску, деформації, акселерометрів, MEMS тощо. Актуальною є проблема вимірювання розподілу механічних напружень на поверхні мікроелектронних структур, які виникають після наплення металічних провідників та компонентної бази на кристалічну підкладку, зокрема – кремнієву. Не менш важливим є реєстрація стаціонарних дефектів, динаміки деформації підкладки, виникнення динамічних механічних напружень при роботі компонентів електроніки на поверхні та всередині інтегральних схем.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є встановлення особливостей зміни механічних напружень шляхом їх безпосереднього вимірювання в найбільш характерній для сучасної електроніки структурі: Si-Al плівка при зміні температури мембрани під час подачі живлення на інтегральний тензорезистор. Задачами дослідження є виявлення оптичної анізотропії на поверхні кремнію з напленнями алюмінієвими доріжками, знайти систему параметрів необхідну для розрахунку механічних напружень з урахуванням шумових та дестабілізуючих факторів.

**Теоретичний розрахунок зміни фази лазерного випромінювання, відбитого від анізотропної поверхні**

На основі якісного розгляду фізики взаємодії лазерного випромінювання з кристалом, діелектричні властивості якого описуються діагональним тензором, а електрична та магнітна компоненти випромінювання не враховуються на довжині поглинання, то остаточний вираз для фази відбитої хвилі  $\Delta$  має вигляд [8]:

$$\Delta = \arctg \left[ \frac{2n'_y n''_y}{1 - (n'_y)^2 - (n''_y)^2} \right] - \arctg \left[ \frac{2n'_x n''_x}{1 - (n'_x)^2 - (n''_x)^2} \right] \quad (1)$$

де  $n'_x, n'_y$  – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж  $y$ -координати;  $n''_x, n''_y$  – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж  $x$ -координати. Оскільки кристал Si має кубічну сингонію та набуває анізотропію діелектричних властивостей при одновісній деформації, то можна прийняти як модель лінійну залежність показників заломлення від одновісного механічного напруження:

$$\begin{aligned} n'_x &= n'_{0x} + C\sigma_x \\ n''_x &= n''_{0x} + C\sigma_x \\ n'_y &= n'_{0y} - \nu C\sigma_y \\ n''_y &= n''_{0y} - \nu C\sigma_y \end{aligned} \quad (2)$$

де  $C$  – константа фотопружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_x, \sigma_y$  – механічні напруження вздовж координат.

**Результати експериментальних досліджень.** У якості об'єкту дослідження був вибраний сенсор тиску, який працює на поперечній тензоЕРС. Суть ефекту витікає із загальної властивості анізотропних напівпровідників, які полягають в не колінеарності електричних полів і струмів якщо до напівпровідника прикласти зовнішню механічну силу стискання або розтягнення. На рис. 3. показаний зовнішній вигляд такого сенсору, який складається з кремнієвої пластини з напрямом кристалу [100] і напрямом зовнішньої деформації вздовж [110], а також самого перетворювача виконаного у вигляді тензорезистора довжиною 200 мкм та шириною 100 мкм. Сам сенсор тиску складається з двох паралельних кремнієвих пластин, але оскільки вони розділені між собою повітряним зазором, структура нижньої мембрани, яка приймає на себе зовнішній тиск, не буде впливати на результати досліджень. Також слід відмітити і той факт, що нижня частина видимого кристалу кремнію витравлена у вигляді трапеційного профілю для підвищення еластичності.

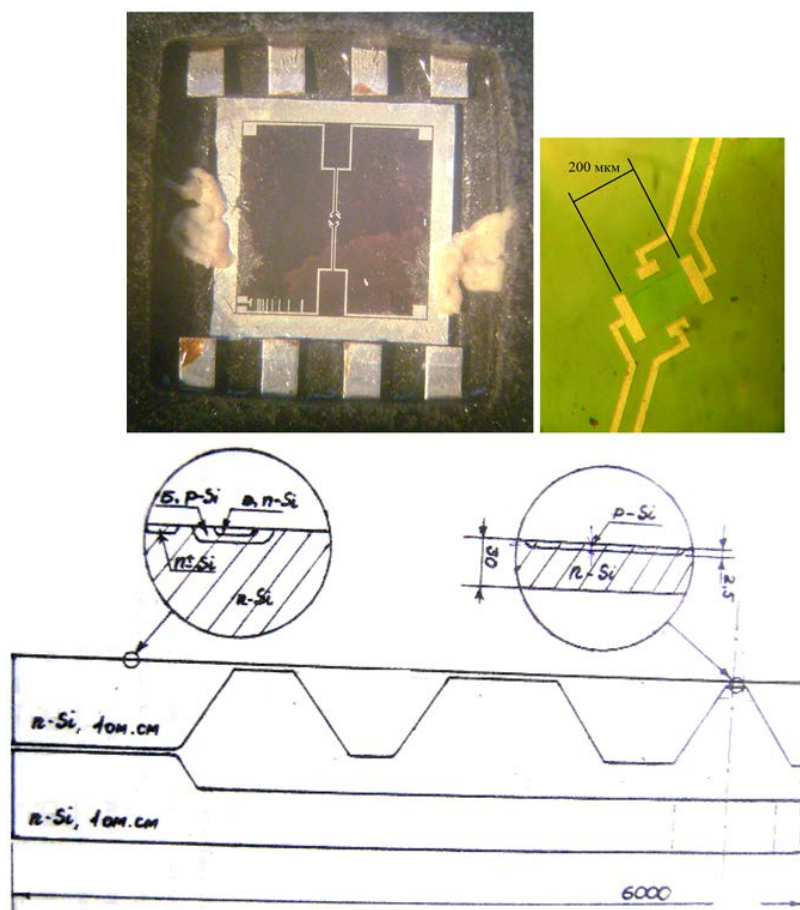


Рис. 3 – Зовнішній вигляд сенсора тиску, кристал Si розміром 6х6 мм (верхній лівий); тензорезистор виконаний методом дифузії на глибині 2,5 мкм, габарити 200х100 мкм, R=900 Ом (верхній правий), поперечна структура сенсора тиску (внизу)

Результати вимірювань представлені на рис.4. Суцільна тонка лінія показує виміряну оптичну анізотропію поверхні кристалу кремнію з двома напиленими алюмінієвими провідниками у виключеному стані. При подачі живлення на тензорезистор напругою 5В та струм 100 мА він почав нагріватись та нагрівати саму мембрану разом з алюмінієвими доріжками, що

в свою чергу змінило оптичну анізотропію поверхні кристалу. Точковою лінією показаний новий розподіл оптичної анізотропії після 10 хв робочого режиму тензорезистора, наступні вимірювання не виявили прогресуючі зміни параметрів кристалу. Різниця між початковою та наведеною нагріванням тензорезистора оптичної анізотропії показана суцільною чорною лінією.

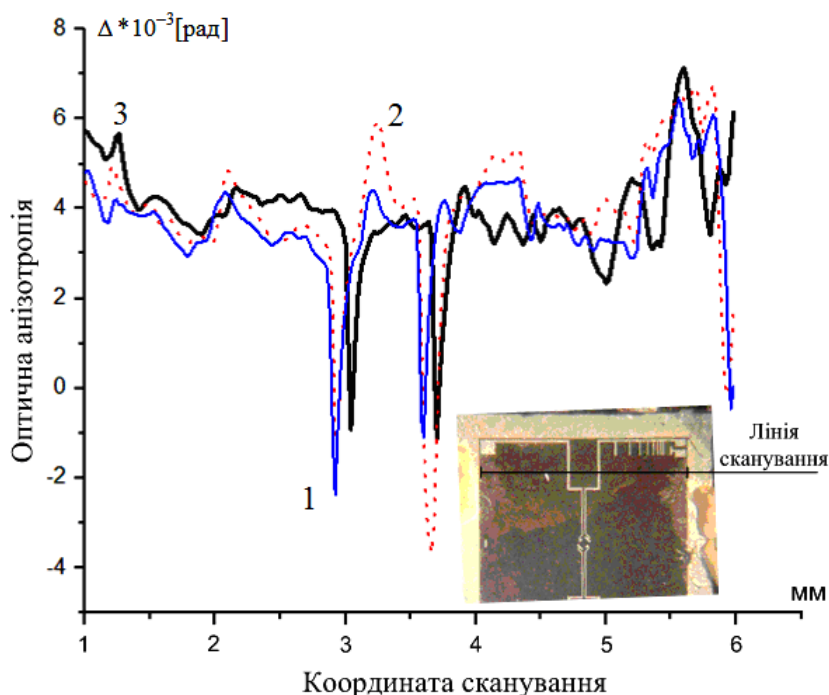


Рис. 4 – Розподіл стаціонарної (1), наведеної або нестационарної (2) оптичної анизотропії на довжині поглинання; різниця між стаціонарною та наведеною оптичною анизотропіями (3)

Скориставшись формулами (1) та (2) був розрахований розподіл механічних напружень на поверхні кремнієвої мембрани з урахуванням зміни коефіцієнта відбиття на границі Si-Al та інших електрофізичних та оптичних параметрів: показник поглинання кремнію  $k=0,000225$ ; показник заломлення кремнію  $n=3.8$ ; коефіцієнт Пуассона кремнію  $\nu=0,4$  та алюмінію  $\nu=0,34$ ; константа фотопружності  $C=0,0007$  кг/см<sup>2</sup>. Розрахунок проводився методом кінцевий різниць з допомогою САПР. Результати розрахунків показані на рис. 5.

Як видно з графіку, внаслідок температурного розширення мембрани на її краях та в околицях алюмінієвих провідників збільшується стискаюче механічне напруження, а під провідниками протилежне за значенням – розтягуюче механічне напруження.

Похибка розрахунків в значній мірі залежить від стабільності цілого ряду прийнятих параметрів, відхилення яких від середнього значення в рамках даної роботи не досліджувалось. Щодо інструментальної та методичної похибки вимірювання оптичної анизотропії, то вони не перевищувала 10 %.

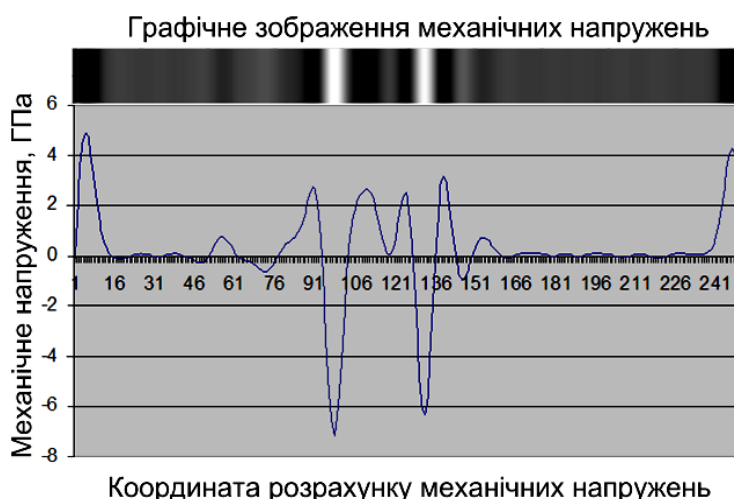


Рис. 5 – Залежність наведеного розподілу механічних напружень на поверхні кремнієвої мембрани від координати (крок розрахунків відповідає 23 мкм). Над графіком представлена еквівалентна діаграма з використанням чорно-білих півтонів

**Висновки.** Використавши високу виявну здатність модуляційної поляриметрії щодо оптичної анизотропії було зібрану установку, здатну реєструвати зміну механічних напружень на поверхні Si як в стаціонарному режимі так і в процесі експлуатації тензорезистивного сенсору тиску. Отримані результати пі-

дтверджують повільну кінетику перехідних процесів в електронній структурі, що дає змогу використати описаний метод дослідження для реєстрації нестационарних перехідних процесів (коли параметри системи не стабільні та змінюються з часом до моменту сталого режиму роботи) [9]. Також отримані експеримен-

тальні результати підтверджують теоретичні викладки стосовно нестационарної теплопровідності, яка докладно описаної в [10]. Слід відмітити високий ступінь якісного узгодження отриманих експериментальних результатів з теоретично передбачуваними, а саме як видно з рис.5. між краями мембрани та Al провідниками є знакозмінні коливання механічних напружень які не зникають після охолодження мембрани, а є відображенням протилежної витравленої поверхні як показано на рис.3. Оскільки довжина поглинання випромінювання з довжиною хвилі 630nm складає біля 2,4 мкм, то реєстрація механічних напружень, які викликані геометричною формою мембрани на глибині 140 мкм представляє додатковий інтерес та буде висвітлена в наступних роботах.

#### Список літератури:

1. Асташенкова, О. Н. Контроль физико-механических параметров тонких пленок [Текст] / О. Н. Асташенкова, А. В. Корляков // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – No2. – С. 24–29.
2. Tamulevicius, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films [Text] / S. Tamulevicius // Vacuum. – 1998. – Vol. 51. No 2. – P. 127–139.
3. Механические напряжения в тонких пленках [Текст] // Обзоры по электронной технике. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 8 (798). – 1981. – 63 с.
4. Принц, В. Я. Нанооболочки и прецизионные наносистемы на основе напряженных гетероструктур [Текст]: автореф. д. физ.-мат. наук: 01.04.10 / В. Я. Принц – Новосибирск, 2005. – 40 с.
5. Кривошеева, А. Н. Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники [Текст]: автореф. дисс. канд.тех. наук: 05.27.01 / А. Н. Кривошеева. – СПб., 2007. – 16 с.
6. Механические напряжения в тонких пленках [Текст] // Обзоры по электронной технике. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 9 (799). – 1982. – 68 с.
7. Рындя, С. М. Особенности структуры тонких плёнок SiC, формируемых методом импульсного лазерного осаждения на подложках Si и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / С. М. Рындя. – М., 2014. – 143 с.
8. Сердега, Б. К. Модуляционная поляриметрия [Текст] / Б. К. Сердега // К.: Наук. Думка. – 2011. – 238 с.
9. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. / – М.: Мир, 1989. – 540 с.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева // Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. – 344 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Astashenkova, O., Korlyakov, A. (2013) Kontrol fiziko-mekhanicheskikh parametrov tonkikh plenok. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2, 24–29.
2. Tamulevicius, S. (1998) Stress and strain in the vacuum deposited thin films // Vacuum, 51(2), 127-139.
3. Mekhanicheskiye napryazheniya v tonkikh plenkach (1981). Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 2 Poluprovodnikovyye pribory, 8(798), 63.
4. Prints, V. (2005) Nanoobolochki i pretsizionnyye nanosistemy na osnove napryazhennykh geterostruktur: avtoref. d. ph.-math. nauk: 01.04.10/ V. Prints – Novosibirsk, 40.
5. Krivosheeva, A. (2007) Passivnyye i aktivnyye membrany dlya ustroystv mikrosistemnoy tekhniki: avtoref. diss. kand. tech. nauk: 05.27.01. SPb, 16.
6. Mekhanicheskiye napryazheniya v tonkikh plenkach (1982). Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 2 Poluprovodnikovyye pribory, 9(799), 68.
7. Ryndya, S. (2014) Osobennosti struktury tonkikh plenok SiC formiruyemykh metodom impulsnogo lazernogo osazhdeniya na podlozhkakh Si i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: dis. kand. phis.-math. nauk: 01.04.07/ Moscow, 143.
8. Serdega, B. K. (2011). Modulyatsiyana polyarimetriya. Kiev: Nauk. Dumka., 238.
9. Bendat, Dzh., Pyrsol, A. (1989). Pрыkladnoy analiz sluchaynykh dannykh. Moscow: Myr., 540.
10. Mykheev, M. A., Mykheeva, Y. M. (1977). Osnovy teploperedachy. Moscow: «Enerhyya», 344.

Надійшла (received) 20.03.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Модуляційно-поляризаційний метод вимірювання внутрішніх механічних напружень в мікроелектронних структурах Si-Al / О. О. Олійник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С. 3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Модуляционно-поляризационный метод измерения внутренних механических напряжений в микроэлектронных структурах Si-Al / О. О. Олейник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С. 3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Modulation-polarization method for internal mechanical stresses measurement in microelectronic structures Si-Al / О. О. Oliinyk**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2015. – No 49 (1189).– P. 3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Олійник Остап Олегович** – аспірант, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус No12. Київ, Україна, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).

**Олейник Остап Олегович** – аспірант, кафедра Електронних приборів та пристроїв, факультет електроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус No12. Киев, Украина, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).

**Oliinyk Ostop Olegovych** – PhD student, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "KPI"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056; tel.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).