

С.П. Новосядлий, В.М. Бережанський

Дослідження термічних напружень в субмікронних структурах ВІС

Кафедра радіофізики і електроніки Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76025 Івано-Франківськ, Україна e-mail: nsp@pu.if.ua, berzhansky@mail.ru

Розроблений метод вимірювання термічних напружень в шарах субмікронних структур ВІС, оснований на п'єзорезистивному ефекті та тестовому контролі електрофізичних параметрів.

Ключові слова: термічне напруження, п'єзорезистивний ефект, тензорезистор, тестовий контроль.

Стаття поступила до редакції 07.07.2005; прийнята до друку 15.09.2006

Великий об'єм досліджень напружено-деформованого стану структур ВІС зумовлений підвищенням вимог до формування топології структур, особливо для субмікронного діапазону. Якість формування структур ВІС в цьому діапазоні розмірів дуже залежить від деформацій та термічних (механічних) напружень, які виникають при нанесенні функціональних шарів. Великі деформації, які викликаються викривленням Si-підкладки, викликають значні відходи розмірів при фотолітографічній обробці і стають обмежувальним фактором на шляху збільшення ступені інтеграції ВІС.

Деформацію Si-пластин із сформованими на ній функціональними шарами дуже зручно контролювати з використанням лазерного чи голографічного інтерферометра. Якщо рахувати, що товщина плівки функціонального шару є постійною величиною, то напруження в плівці можна визначити за величиною прогину Si-пластини з використанням формули Стоуні .

$$\sigma = \frac{1}{6} \frac{E}{1-\mu} \frac{d^2}{t} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

де E – модуль Юнга (для Si $E=1,3 \cdot 10^{11}$ Н/м²), d – товщина Si-підкладки, μ – коефіцієнт Пуассона (для Si $\mu=0,28$), t – товщина плівки функціонального шару; R_1 , R_2 – радіуси кривизни Si-підкладки до і після нанесення функціонального шару, який розраховувався за величиною прогину Si-пластини $R = D^2/8f$ (f – величина прогину пластини). Для зручності рахується, що R є від'ємним для випуклої поверхні Si-пластини, що відповідає напруженням стиску в плівці, і додатнім для вгнутої поверхні, що дає напруження розтягу в плівці.

На рис.1, 2 зображена залежність деформації Si-

пластини при зміні співвідношення кисню та тетраметоксилана (ТМОС) в суміші і потужності, що підводиться до високочастотного реактора плазмохімічного осадження.

Правильне розуміння механізму пружних термомеханічних напружень, які виникають в системі плівка-підкладка, мають важливе значення, бо впливають на електрофізичні параметри і їх стабільність сформованих приладних структур ВІС. Так вимірювання проведені при кімнатній температурі після термічного оксидування кремнію, показують, що SiO₂ знаходиться в стані стискання на поверхні, а величина пружних напружень для T=800-900°C складала $(3-7) \cdot 10^9$ днН/см², а з підвищення температури >1000°C вони вже зменшилися і складали $(3-7) \cdot 10^7$ днН/см²(Н/м²). Властивості плівок SiO₂, які осаджені із парогазових сумішей мають різні знаки і величини пружних напружень, а саме: плазмохімічний SiO₂ має також стискуючі напруження, а інші способи з використанням газових сумішей SiH₄+O₂, ТЕОС та SiCl₂H₂+N₂O дають як розтягуючі, так і стискуючі напруження. Такі високі значення пружних напружень приводять до складного розподілу напружень на краях функціональних шарів після фотолітографічного формування топології функціонального шару. Інколи для зменшення пружних напружень використовують багат шарові функціональні пласти, наприклад, для зменшення релаксації пружних напружень локального окислу в технології Locos використовується двошарова плівка – термічний SiO₂+ Si₃N₄, бо останній при осадженні його із парогазової суміші SiH₄+NH₃ в реакторі зниженого тиску створює вже розтягуючі напруження до 10^8-10^9 днН/см².

Виходячи із вище приведених експериментальних досліджень, необхідно було

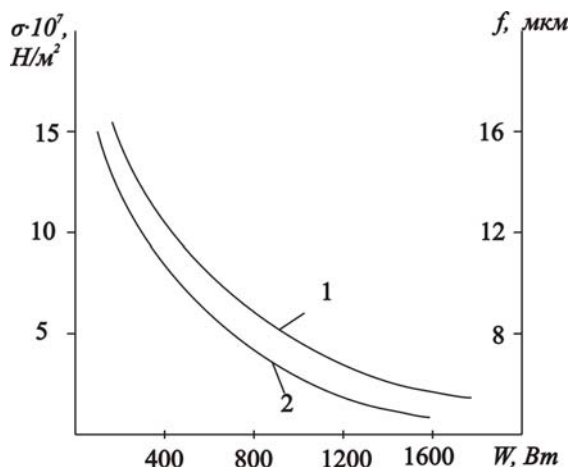


Рис. 1. Залежність напружень в плівці SiO₂ і прогину Si-пластин від потужності плазми: 1 – напруження в плівці, 2 – прогин Si-пластини (O₂=95 %, t=0,8 мкм, d=420 мкм)

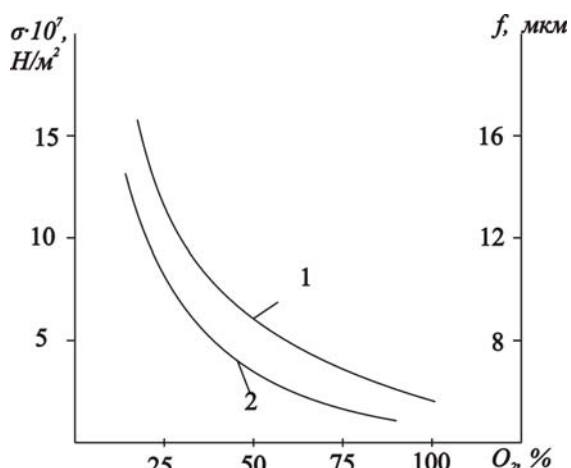


Рис. 2. Залежність напружень в плівці SiO₂ нанесеній ПХО та прогину Si-пластин від вмісту O₂ в реакторній суміші: 1 – напруження в плівці, 2 – прогин Si-пластини (W=1600 Вт, t=0,6 мкм, d=420 мкм)

розробити метод електричної оцінки напружено-деформаційного стану в шарах елементів ВІС, який можна було б включити в тестовий контроль діагностування надійності структур ще на стадії їх формування.

Одна із причин відказів ВІС – це поля термічних напружень (ТН), що виникають в функціональних шарах на різних стадіях технологічного процесу формування структур ВІС і при їх монтажі в корпус через евтектичний спай. Відомо, що ТН в зоні пружності напівпровідників приводить до зміни структури і енергетичних зон, і, відповідно, до температурної нестабільності електрофізичних та електричних параметрів елементів ВІС; ТН є причиною пластичної деформації напівпровідників, особливо в областях концентрацій термічних напружень (сходинок); наявність ТН приводить до розтріскування та відшарування функціональних шарів та порушення цілісності кристалів при

евтектичному монтажі їх в корпус чи стрічковий носій; ТН спричиняють короблення Si-пластин та викликають великі розсміщення елементів при фотолітографічному переносі зображення [1].

На рівні ТН в шарах структур ВІС впливають багато конструкторсько-технологічних факторів ще на стадіях розробки структури ВІС та технологічного процесу її формування. За результатами вимірювань ТН можна виявити ступінь узгодженості термомеханічних характеристик матеріалів і їх композицій, що використовуються в функціональних шарах ВІС, а також уточнити технологічні процеси і режими їх формування. Крім цього по рівню і стабільності ТН в шарах можна визначати та прогнозувати надійність структур ще на стадії їх формування.

Ефективний напрям при такому діагностуванні надійності є використання спеціальних тестових структур (ТС) та тестового контролю (ТК) [2], які дозволяють ще на стадії формування функціональних шарів оцінити напружено-деформаційний стан (НДС) в шарах елементів ВІС. Тому цікавим в цьому напрямі є тензометричний метод діагностування надійності за рівнем ТН.

Зміна опору напівпровідникових терморезисторів (ТР) під дією (ТН) пояснюється п'єзорезистивним ефектом, тобто залежністю питомого опору напівпровідника від напружено-деформаційного стану (НДС) і орієнтації тіла терморезистора відносно кристалографічних напрямків. При достатньо помірних рівнях ТН зміна опору ТР є пропорційною цим напругам. Тензочутливість ТР може бути обчислена з використанням п'єзорезистивних коефіцієнтів. В декартовій системі координат Oxyz, вісь Oz направлена перпендикулярно робочій площині напівпровідникової пластини, в якій формуються структури ВІС (там же формується і ТР), а вісь Ox вздовж напрямку струму I в ТР при однорідному розподілі термо-механічних напружень в тілі резистора п'єзорезистивні коефіцієнти визначаються за формулами

$$\pi_x^z = \Delta R / (R_H \sigma_{1x}) \text{ при } \sigma_{1y} = \tau_{1xy} = 0 \quad (2)$$

$$\pi_y^z = \Delta R / (R_H \sigma_{1y}) \text{ при } \sigma_{1x} = \tau_{1xy} = 0 \quad (3)$$

$$\pi_{xy}^z = \Delta R / (R_H \tau_{1xy}) \text{ при } \sigma_{1x} = \sigma_{1y} = 0 \quad (4)$$

де π_x^z , π_y^z , π_{xy}^z – поздовжній, поперечний і зсувний п'єзорезистивні коефіцієнти для заданої орієнтації ТР в Si-пластині; ΔR – зміна опору ТР під дією ТН відповідного виду; R_H – початковий опір тензорезистора при відсутності напружень; σ_{1x} , σ_{1y} , τ_{1xy} – нормальна і тангенціальна складові напруг в тілі ТР. Для випадку, коли є присутніми всі три види ТН, сумарна зміна опору у відповідності з формулами (2)-(4) буде

$$\Delta R_z = (\pi_x^z \sigma_{1x} + \pi_y^z \sigma_{1y} + \pi_{xy}^z \tau_{1xy}) R_H \quad (5)$$

Розглянемо тепер характеристику напівпровідникових тензорезисторів, сформованих в технологічному циклі структур ІС. Тензорезистори

(ТР) формуються як тестові елементи для контролю ТН в функціональних шарах на Si-пластині (напівпровідниковій) в приповерхневому шарі підкладки методом дифузії чи іонного легування в єдиному технологічному процесі з одним із напівпровідникових функціональних шарів. При цьому необхідно зауважити наступне: тензорезистори є найбільш простими в конструкторському відношенні серед всіх елементів ВІС і можуть бути сформовані на основі любого легованого напівпровідникового шару (захованого, роздільного, базового, колекторного, емітерного, провідного, охоронної області, кишені, стік-витоків області) на ранніх стадіях формування інтегральних елементів. Деформаційні ефекти в ТР пояснюються на основі досить простих моделей. Для вимірювання електрофізичних параметрів ТР використовуються високопрецизійні вимірювальні засоби. Є чимало публікацій, результати яких дозволяють теоретично оцінити чутливість ТР для різних орієнтацій кремнієвих пластин і напрямів в них. Напівпровідникові ТР вже довгий час використовують для вимірювання ТН, які виникають на операціях монтажу чи складання, а також як сенсори тиску [3]. Метод полягає в порівнянні початкового опору R_H ТР в вихідному стані кристала до складання і кінцевого значення опору R_K після його встановлення в корпус чи кристалотримач. По зміні опору $\Delta R = R_K - R_H$ і відомої тензочутливості Si визначається її рівень. Для повної оцінки НДС в кристалі використовують спеціальні розетки із двох або трьох ТР з різною кутовою орієнтацією в площині пластини.

ТР не можуть бути використані безпосередньо для вимірювання ТН в шарах елементів на Si-пластині по ряду причин, що визначаються низькою чутливістю. Так, для шару Si_3N_4 товщиною $h_2=0,2$ мкм, що осаджується в реакторі зниженого тиску середнє значення напруження $\sigma_2=1000$ МПа, тоді як для товщини $h_1=0,4$ мкм напруження $\sigma_1=2$ МПа. При чутливості 10^{-3} МПа⁻¹ відносна зміна тензоопору буде складати лише 0,2 %, що співставимо з термічним коефіцієнтом опору кремнієвих ТР, який складає 0,1-0,3 %/°С.

Чутливість тестових терморезисторів до ТН в функціональному шарі суттєво збільшується, якщо в повній мірі використати явище концентрації напружень в Si-підкладці поблизу країв зони. Поперечний переріз двох варіантів ТР, із геометричними розмірами довжини l , ширини $2b$ та висоти h_R і сформованих одним із методів локального легування, подані на рис. 3. Утворений на Si-пластині діелектричний шар 3, товщиною h_2 , наноситься і на поверхні ТР (рис. 3,б). Концентратори напружень формують наступним чином: в першому варіанті методом фотолітографії вскривається прямокутне вікно з шириною $2a$, а в другому – утворюється прямокутна смуга з тією ж шириною $2a$. Краї діелектрика як в одному, так і в другому варіантах знаходяться на невеликій віддалі $c=a-b$ від бокових сторін ТР. Це забезпечує високу чутливість ТР до

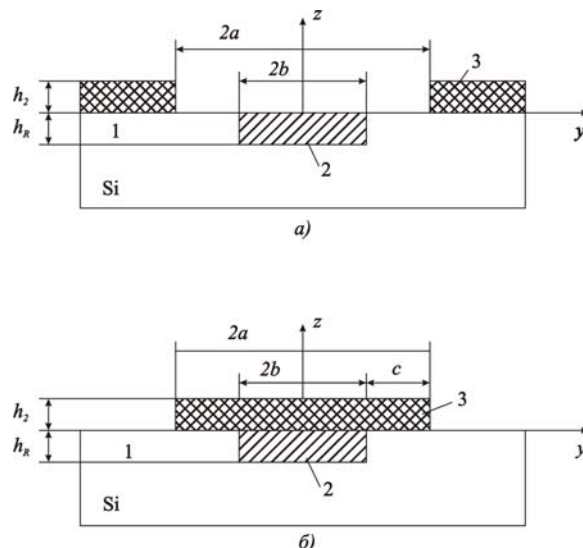


Рис. 3. Тензорезистори з двома варіантами концентраторів напруг (1 – Si-підкладка, 2 – ТР, 3 – функціональний шар).

напружень σ_2 в контрольному функціональному шарі, діючи перпендикулярно поздовжній осі ТР. Тому при формуванні таких ТР необхідно забезпечити:

- достатньо велике співвідношення c/b з метою зниження впливу неоднорідностей НДС поблизу коротких сторін ТР на точність вимірювання;
- оптимальне значення віддалі $c=a-b$ для забезпечення високої чутливості ТР до вимірюваної величини ТН і не впливовому розкиду розмірів елементів ТС на точність вимірювання;
- мале відношення h_R/b дозволяє спростити розрахункові формули.

Крім цього, з метою зниження впливу відхилення геометричних розмірів та електрофізичних параметрів ТР, а також навколишнього середовища на точність вимірювання одночасно повинні формуватись дві близько розміщених однакових за геометричними розмірами і електрофізичними параметрами ТР (рис. 4). Початковий опір ТР-ної пари є майже однаковими ($R_{1H} \cong R_{2H}$), а далі в процесі формування контролюємомого функціонального шару вони змінюються в однаковій степені. Різна чутливість ТР-ної пари до ТН в утвореному шарі забезпечується шляхом формування різних концентраторів (різної геометричної конфігурації). Таким чином, в ТР-ій парі, по крайній мірі, один повинен бути чутливим до ТН в функціональному шарі (ЧТР), а другий буде опірним (ОТР), тобто нечутливим до ТН в цьому шарі. Крім цього, ще в одному варіанті такої пари ТР повинні мати чутливість протилежного знаку (рис. 4в). В останньому випадку для забезпечення ідентичності стану поверхонь ТР перед формуванням функціонального шару по всьому ТР необхідно нанести суцільний тонкий діелектричний шар. Робоча формула для визначення ТН в утвореному шарі має вигляд:

$$\sigma_2 = (R_{1K}/R_{1H} - R_{2K}/R_{2H}) / (S_1 - S_2) \quad (6)$$

де індекси 1,2 відповідають першому і другому ТР. Для варіанта пари ЧТР –ОТР формула (6) приймає вигляд:

$$\sigma_2 = (R_{1K}/R_{1H} - R_{2K}/R_{2H})/S_1 \text{ бо } S_2 \text{ для ОТР}=0 \quad (7)$$

Таким чином, описані ТР з концентраторами напружень використалися нами для вимірювання ТН в функціональних шарах структур ВІС.

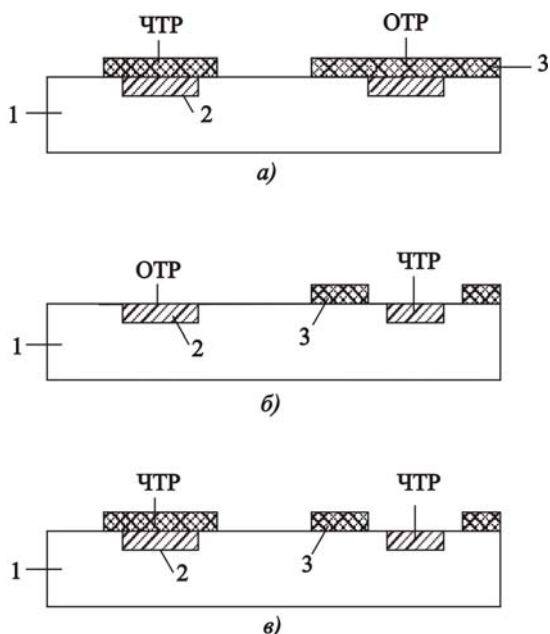


Рис. 4. Пари ТР для вимірювання напружень функціональних шарів структур ВІС (1 – Si-підкладка, 2 – ТР, 3 – функціональний шар).

Експериментальна оцінка даного методу проводилась на спеціальній тестовій структурі. Топологія даної ТС приведена на рис. 5. Обидва тензорезистори (ЧТР і ОТР) знаходяться під контролюючим діелектричним функціональним шаром, який виконує роль захисного. Розміщення контактних площадок ТС забезпечує вимірювання опорів тензорезисторів 4-зондовим методом. В Si-підкладках типу КЕФ4,5-(100) формувались тензорезистори і дифузійні провідники до контактних площадок шляхом дифузії (або ІЛ) бору з поверхневим опором

$$\rho_s = 520 \text{ Ом/квдрат} \pm 20 (N_B = 5 \cdot 10^{17} - 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3})$$

при глибині дифузії 0,6 мкм. При цьому орієнтація тензорезисторів забезпечувалась в напрямі <011>. Далі на Si-структуру наносився діелектричний функціональний шар, що містить тонкий підшар SiO₂ товщиною 25 нм, сформований термічним оксидуванням в сухому O₂ при T=1000°C і основний ізолюючий шар Si₃N₄ (Si_xO_yN_z) товщиною 0,33 мкм і 0,54 мкм, що формувався в реакторі зниженого тиску типу «Ізотрон-4» хімічним осадженням реакцією дихлорсилану SiH₂Cl₂ в атмосфері аміаку NH₃ при T=770-800°C. Підшар SiO₂ виключав взаємодію Si₃N₄ та Si. Далі в діелектричному шарі методом літографії вскривались вікна до дифузійних доріжок та формувались контактні площадки за допомогою металізації, сформованої магнетронним розпиленням мішені АКН₀-1-1 в аргонній плазмі. Потім

вимірювались на тестері АІК TEST опори тензорезисторів R_{1H} і R_{2H}. Далі методом літографії та анізотропного плазмохімічного травлення діелектричного шару вскривались вікна під концентратори чутливих тензорезисторів (ЧТР). І знову вимірювали вже кінцеві значення цих опорів R_{1K}, R_{2K}. Для всіх тензорезисторів віддалі від бокових сторін ТР до краю концентратора фіксувалась як c=2,5±0,1 мкм та c=1±0,1 мкм.

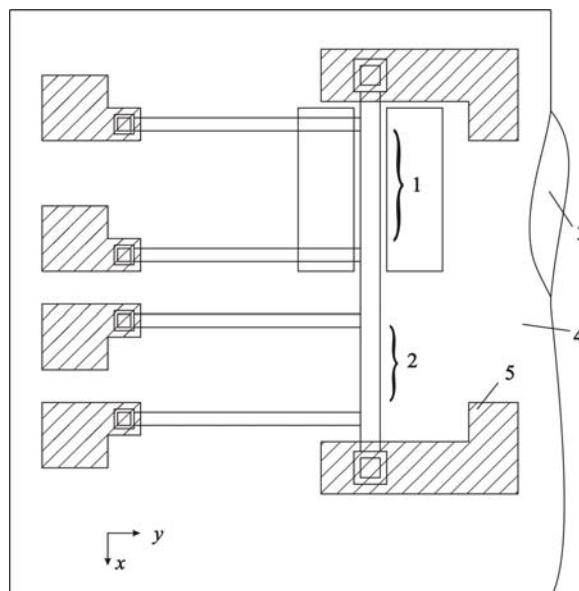


Рис. 5. Тензорезистивна тестова структура для вимірювання ТН в функціональних шарах (1 – ЧТР, 2 – ОТР, 3 – Si-підкладка КЕФ4,5-(100), 4 – функціональний шар, 5 – провідний шар контактної площадки (КП)).

Середнє значення ТН σ_2 в діелектричному функціональному шарі, обчислене по прогину Si-пластини-супутника з даним шаром складо для більш тонкого функціонального шару (h₂=0,33 мкм) 879 МПа, а для більш товстого (h₂=0,54 мкм) 974 МПа при їх середньоквадратичному відхиленні (СКВ) відповідно 59 МПа та 27 МПа. Вимірні різниці відносних змін опорів тензорезисторів склали відповідні значення δR та їх чутливості S для ТН, обчислені за

$$\text{формулами} \begin{cases} S = \delta R / \sigma_2 \\ \delta R = (R_{1K}/R_{1H} - R_{2K}/R_{2H}) \end{cases}, \text{ які подані в}$$

таблиці 1.

Як бачимо із обчислених значень δR та S, що чутливість тензорезисторів до термомеханічних напружень зростає з ростом товщини функціонального шару, який приводить до росту напружень в концентраторах. Додатні значення зміни опору тензорезисторів δR відповідає від'ємному значенню σ_{1y} тіла чутливого тензорезистора або додатному σ_2 в функціональному шарі, що відповідає кремнію р-типу (сформованим тензорезисторам) $\pi_y^x < 0$.

Така ТС дозволяє експериментально визначити

Таблиця 1

Чутливість ТР до ТН функціонального шару.

h_2 , мкм	b , мкм	δR , середнє %	$(c=2,5 \text{ мкм})$ $S \cdot 10^{-5}$, МПа $^{-1}$	δR	$(c=1 \text{ мкм})$ $S \cdot 10^{-5}$, МПа $^{-1}$
0,33	6	3,95	4,49	7,28	9,02
	10	3,24	3,69	6,51	7,38
0,54	6	6,52	6,69	13,12	13,58
	10	5,30	5,44	11,21	11,68

всі термічні напруження в функціональних шарах, які використовуються в технологічному процесі формування субмікронних структур. Слід відзначити, що чутливість даного методу збільшується з зменшенням віддалі тензорезистора до концентратора $c \leq 1$ мкм в 2-3 рази і дає можливість

встановлювати оптимальні значення режимів процесів формування функціональних шарів в субмікронних структурах ВІС.

Новосядлий С.П. – доктор технічних наук, професор;
Бережанський В.М. – аспірант кафедри.

- [1] С. П. Новосядлий. *Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС*. Сімик, Івано-Франківськ. 351с. (2003).
- [2] С. П. Новосядлий. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. (3), сс. 30-38 (1999)
- [3] В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Летягин. *Напряжения и деформации в элементах микросхем*. Радио и связь, М. 88с. (1987).
- [4] В.Н. Брюнин, В.Ф. Устинов. Применение технологических тестовых структур в разработках и производстве интегральных схем // *Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация*. 72(2), сс.28-30 (1979).
- [5] В.Н. Панасюк, В.Г. Монеров, Е.Н. Овчаренко. Методология контроля по электрическим тестовым компонентам // *Микроэлектроника*. 13(6), сс.539-575 (1984).
- [6] А.С. Герасимова. Использование тестовых структур в производстве ИС // *Зарубежная радиоэлектроника*. №10, сс.53-62 (1988).
- [7] С.М. Кузин, В.Г. Монеров, В.Н. Панасюк. Метод оценки оборудования и процессов создания БИС с помощью исследования ТС // *Электронная промышленность*. (2), сс.19-22 (1987).
- [8] А.В. Багдасарин, Н.П. Захаров, В.С. Сергеев. Анализ анизотропии пьезорезистивных легированных слоев кремниевых пластин // *Электронная техника – Сер. 3, Микроэлектроника* – 120(4) сс.31-38 (1986).
- [9] S. Isomac. Stress distribution in silicon crystal substrates with thin films // *J. Appl. Phys.* 52(4), pp.2787-2791 (1981)
- [10] Л.В. Беляев, В.И. Жуков, С.М. Заседателев. Интегральные измерительные преобразования для контроля технологического процесса сборки микросхем // *Электронная промышленность*. (9), сс.34-37 (1974).
- [11] J.L. Spencer, H. Schroenw, G.A. Bednarz. New quantitation measurement of IC stress introduced by plastic packages // *19-th Annual Proc: Reliab. Phys.*, Orlando, pp.74-80 (1981).
- [12] С.П. Радковский. Измерение остаточных технологических напряжений розеткой из диффузионных тензорезисторов // *Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудования*. 77(7), сс.12-17 (1976).
- [13] С.А. Добролеж, А.С. Клименко, В.В. Климовская, Н.А. Ситенок. Исследование механических напряжений в полупроводниковых структурах и элементах конструкции // *Электронная промышленность*. (10), С.83 (1982).

S.P. Novosyadly, V.M. Berezhansky

Investigation of the Thermal Stress in Submicron Structures VLSI

The Precarpathian National University, T. Shevchenko Str., 57, 76025, Ivano-Frankivsk Ukraine,
e-mail: nsp@pu.if.ua, berezhansky@mail.ru

The method of thermal stress measuring in layers submicron structures of VLSI is developed. This method based on a piezoresistive effect and test control of electro-physical parameters.