ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2013. Випуск 3. С. 54–61
Electronics and information technologies. 2013. Issue 3. P. 54–61

УДК 621.315.592

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНОДЕФОРМОВАНИХ МОНОКРИСТАЛІВ *p*-Si

Б. Павлик[1], Р. Дідик[1], Р. Лис[1], Д. Слободзян[1], А. Грипа[1], Й. Шикоряк[1], М. Кушлик[1], І. Чегіль[2]

[1]*Львівський національний університет імені Івана Франка*
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua
[2]*НВП "Карат", вул. Стрийська, 202, 79031, Львів, Україна*

Досліджено зміни опору монокристалічного зразка *p*-Si за кімнатної температури в процесі його стискання або зняття механічного навантаження. Виявлено, що під час витримки досліджуваного зразка в зупиненому пресі опір зразка зростає. Досліджено, що між окремими циклами деформації відбувається поступове і тривале збільшення опору зразка. Селективним травленням поверхні (111) виявлено підвищену дефектність ділянки приповерхневого шару зразка, на яку нанесено плівку алюмінію. Цей факт, на думку авторів, зумовлює зміну опору зразка в разі одновісної його пружної деформації.

Ключові слова: приповерхневий шар, монокристалічний кремній, одновісна деформація, омічні контакти.

Попередніми [1] нашими дослідженнями з'ясовано, що електропровідність пружно деформованих зразків змінюється з часом їхньої витримки за кімнатної температури.

Основними чинниками, що зумовлюють деградацію напівпровідникових приладів (незворотні зміни їхніх характеристик), є виникнення, трансформація і міграція дефектів кристалічної ґратки. Дефекти утворюються в процесі вирощування кристалів, під час подальшої термічної, радіаційної обробок, а також у процесі експлуатації, у разі прикладання зовнішніх електромагнітних полів і деформації.

Зміна електропровідності монокристалів кремнію в процесі пружної деформації зумовлена низкою чинників. Основні з них такі.

1. Деформація кристалічної ґратки p-Si може спричинити зміну структури його енергетичних зон, що, відповідно, призведе до зміни співвідношення між концентраціями "важких" та "легких" дірок (з ефективними масами, відповідно, 0,52 та 0,16 маси електрона [2]).

Згідно з численними експериментами, коефіцієнти п'єзоопору залежать від значення і типу провідності, а також від температури та деформації. В області домішкової провідності тензор питомого опору (ρ) можна виразити через концентрацію носіїв заряду (p) і тензор рухливості (μ):

$$\rho = \frac{1}{ep}\mu^{-1} \qquad (1)$$

© Павлик Б., Дідик Р., Лис Р. та ін., 2013

Отже, зміна питомого опору може бути зумовлена або зміною концентрації носіїв заряду, або зміною рухливості.

Структура валентної зони діркового кремнію, як і германію, арсеніду галію та багатьох інших напівпровідників, є значно складнішою, ніж зони провідності. Валентна зона є виродженою, вона має дві гілки – енергії легких та важких дірок (рис. 1, *1*, *2*), які зливаються в центрі зони Бриллюена, а також ще одну гілку (див. рис.1, *3*), відщеплену внаслідок спін-орбітальної взаємодії.

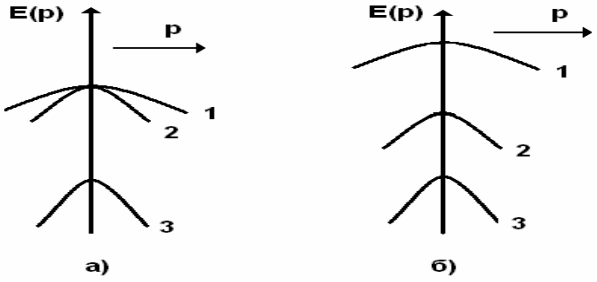

Рис. 1. Структура валентної зони недеформованого (*а*)
та анізотропно деформованого p-Si.

У загальному випадку симетрія напівпровідника під дією довільної деформації знижується і спектр електронів змінюється. У цьому разі повністю або частково знімається виродження енергетичного спектра [2, 3]. Вершини валентної зони легких та важких дірок зміщуються у протилежних напрямах і на різне значення. Таке зміщення зон енергії легких та важких дірок змінює їхню концентрацію зі збереженням повної концентрації дірок у випадку домішкової провідності в області виснаження:

$$p_{\text{лег}} + p_{\text{важ}} = p = N_A, \left|\delta p_{\text{лег}}\right| = \left|\delta p_{\text{важ}}\right| = \delta p \qquad (2)$$

Такий перерозподіл важких та легких дірок змінює електропровідність завдяки їхній різній рухливості:

$$\delta\sigma = e(\delta p_{\text{лег}}\mu_{\text{лег}} - \delta p_{\text{важ}}\mu_{\text{важ}}) = e\delta p(\mu_{\text{лег}} - \mu_{\text{важ}}) \qquad (3)$$

2. У пружно деформованій кристалічній ґратці виникають сили, які спричиняють рух дефектів, їхню коагуляцію в кластери та конденсацію на дислокаціях [4]. Механічні напруження в кремнії можуть виникати і в разі напилення на ньому металічних плівок [1]. Такі напруження виникають унаслідок невідповідності параметрів ґраток і коефіцієнтів температурного розширення кремнію та плівки. Крім того, напилена на поверхню Si металічна плівка слугує ефективним гетером для глибокорівневих структурних дефектів [5]. Такими дефектами, що гетеруються в приконтактному шарі напівпровідник–метал, можуть бути домішкові атоми, винесені з об'єму зразка в приповерхневу ділянку, атоми кремнію, які виходять з вузлів ґратки у міжвузлову область, та вакансії, що утворюються в разі такого виходу [6]. Зміна дефектного фону в кристалі повинна вплинути на концентрацію та рухливість носіїв заряду, з якими пов'язана електропровідність напівпровідника.

Однак вплив тих чи інших чинників на характер зміни опору у випадку багаторазового стискування напівпровідникового монокристалічного зразка та зняття з нього меха-

нічного навантаження, а також витримки його між циклами стискання–розтискання за кімнатної температури різний час у літературі не описано.

Ми досліджували зміни опору зразка за кімнатної температури в процесі його стискання або розтискання та під час його витримки за умов зупиненого пресу.

Об'єктами дослідження цих явищ були зразки *p*-Si марки КДБ 1–10 розміром 4,0×3,7×7,6 мм з прошліфованими та хімічно відполірованими поверхнями [7]. На бічні грані (111) зразка, біля його торців, вакуумним напиленням на нагріту до 593 К підкладку нанесено алюмінієві контакти шириною 1,5 мм і товщиною 240–250 нм. До цих контактів термокомпресійним методом приварювали золоті дротини, після чого їх механічно фіксували на поверхні зразка епоксидним клеєм. Зразок у спеціальній касеті припаювали золотими дротинами до виводів, електроізолювали слюдяними прокладками і поміщали у прес, змонтований у вакуумній камері з безмасляною відкачкою. Опір вимірювали у вакуумі за тиску залишкових газів порядку 10^{-3} Па та одновісного стиску зразка з торців (у напрямі $[11\bar{2}]$) силою від 15 до 40 МПа зі швидкістю 8 або 32 мкм/хв.

Результати досліджень зміни поздовжнього опору зразка від тиску показано на рис. 2.

З графіків на рис. 2 можна зробити такі висновки:

• під час дослідження R(P) пружно здеформованого зразка, який після зняття навантаження тривалий час був витриманий за кімнатної температури, у разі першого стискання простежується значне зростання опору у два етапи (див. рис. 1, *а*);

• хід зміни опору під час наступного (після розтискання) стискання зразка має вигляд параболи з максимумом в інтервалі 27–30 МПа. Це характерне для всіх чотирьох графіків (див. рис. 2, *а*–*г*);

• у разі розтискання зразка його опір стає меншим, ніж за попереднього стискання, і перетинає відповідну криву попереднього стискання в ділянці невеликого залишкового стиску зразка;

• за умов витримки у стисненому стані (механізм руху преса вимкнено) (див. рис. 2, *б*, *в*) або в кінці процесу розтискання (див. рис. 2, *в*, *г*) опір зразка повільно зростає, а механічне напруження спадає, що зумовлює хід цих ділянок кривих ліворуч і вверх. Надалі в експерименті таке збільшення опору зберігається, і наступні криві R(P) йдуть вище на значення цього приросту;

• збільшення опору зразка внаслідок циклів стискання–розтискання має характер сходинок: наступний цикл зміни опору під час деформації починається з його кінцевого значення, досягнутого попереднім циклом (якщо не було значної перерви між циклами, про що йшлося вище);

• збільшення швидкості деформації зразка (див. рис. 2, *б*, *в*) не спричиняє помітних змін у ході кривих R(P);

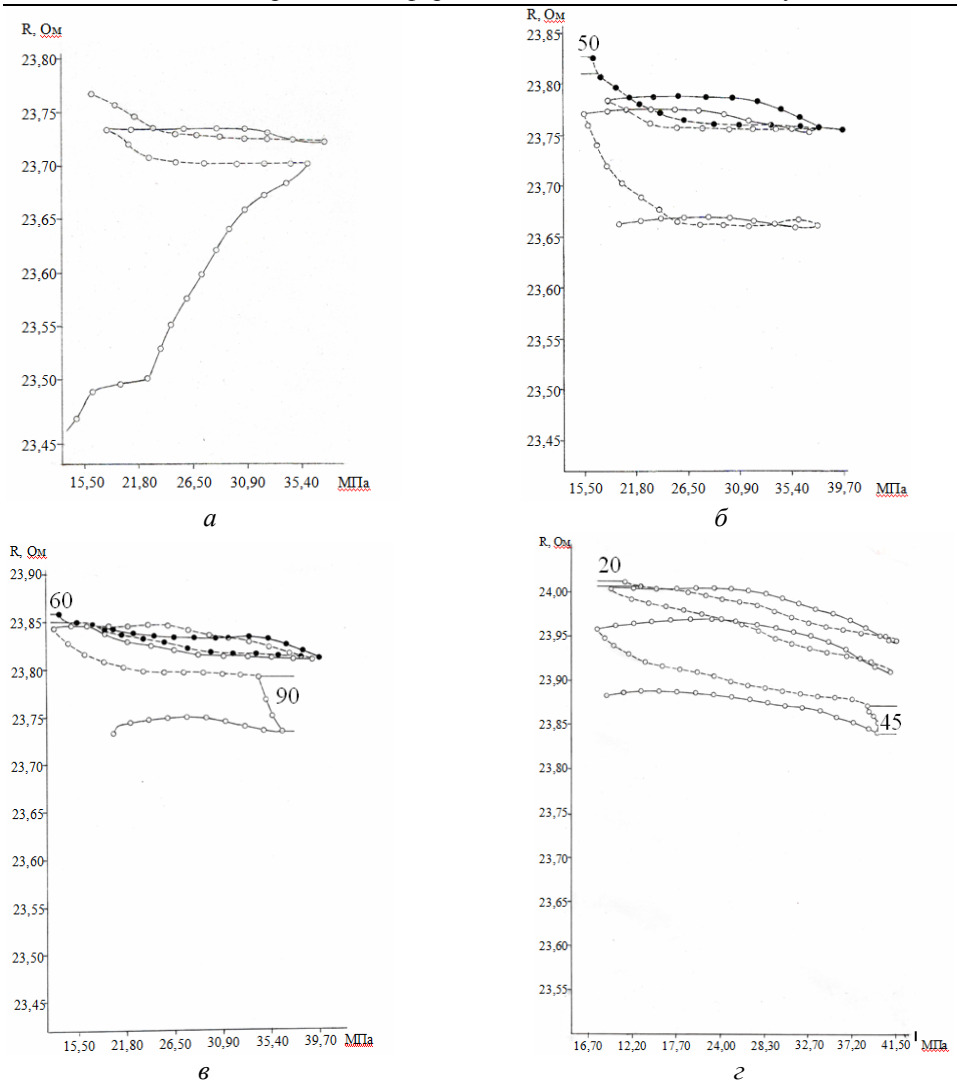

Рис. 2. Залежність поздовжнього опору зразка КДБ 1–10 під час пружної деформації з наростаючою (суцільна лінія) або спадною (штрихова лінія) силою стиску зі швидкістю 8 мкм/хв (◦) або 32 мкм/хв (•).Горизонтальними рисками виокремлено ділянки зміни опору та сили стиску зразка після припинення деформації на час (хвилини), вказаний біля рисок:
а – зразок був пружно здеформований силою стиску близько 50 МПа, після чого деформаційне навантаження знято і зразок витриманий за кімнатної температури більше місяця;
б – зразок витриманий у вакуумі протягом 980 хв після експерименту, показаного на *а*; *в* – зразок витриманий у вакуумі протягом 5 460 хв після експерименту, показаного на *б*;
г – зразок витриманий у вакуумі протягом 1 740 хв після експерименту, показаного на *в*.

• після тривалих витримок зразка за кімнатної температури (див. рис. 2, *б–г*) опір зразка накопичується після кожної серії деформування, якщо не враховувати незначний його спад після перших двох серій (див. рис. 2, *б*, *в*).

Отримані залежності R(P) можна прокоментувати так.

Поступове і тривале накопичення опору зразка відбувається між окремими циклами деформації, у випадку припинення стиску, після повного зняття навантаження на зразок (протягом 1–2 год). Це свідчить про дифузійні процеси в кристалічній ґратці, у яких беруть участь точкові або невеликі скупчення дефектів. Відомо, що відпалювання таких дефектів, особливо за кімнатної температури, – процес тривалий [8]. Названі дефекти, коагулюючи у більші кластери, у вигляді мікропор, скупчень міжвузлового кремнію та домішок приводять ґратку у більш рівноважний стан, зменшуючи в ній механічні напруження (див. рис. 2, *б*, *в*). Накопичення таких дефектів у кристалічній ґратці спричиняє зменшення її провідності.

Пружна деформація зразка з тривалою витримкою в ненавантаженому стані за кімнатної температури без прикладеного електричного поля (електропровідність не вимірювали) приводить до появи в ґратці акцепторних центрів, здатних віддавати носії струму (дірки у p-Si) в разі появи електричного поля. На рис. 2, *а* спостерігаємо два типи таких центрів, одні з яких виснажились раніше (перша сходинка на кривій R(P) у разі стискання до 18 МПа), інші – пізніше. У наступних експериментах з дослідження R(P) такі акцепторні центри не накопичуються й у випадку їхньої появи під час деформації зразка віддають носії струму під дією прикладеного електричного поля. Тут треба враховувати, що поява таких акцепторних центрів – це лише один з чинників, який може впливати на провідність *p*-Si. Під час стискання кристалічної ґратки, як зазначено вище, може змінюватись співвідношення між “важкими” і “легкими” дірками. Накладанням лише цих двох чинників можна пояснити параболічний хід кривих R(P) у разі стискання зразка і нижчий їхній хід у разі розтискання, коли згадані чинники перестають діяти. Підтвердженням того, що ці чинники мають “безінерційний” характер, слугує те, що вигляд кривих R(P) не залежить від швидкості стискання зразка.

Не з’ясоване питання, наскільки описані залежності R(P) стосуються всього зразка чи приповерхневого шару кремнію [1], який межує з електроконтактною алюмінієвою плівкою, необхідною для створення омічних контактів з *p*-Si. Для виявлення аргументів одержання відповіді на поставлене питання ми провели детальніші дослідження процесів дефектоутворення в такому межовому шарі кремнію на грані (111) *p*-Si.

Нанесену описаним вище способом алюмінієву плівку розчиняли травленням зразка протягом 3 хв у HCl. Після цього зразок протравили протягом 2–4 хв у хромовому селективному травнику для декорування дрібних скупчень дефектів плиткими ямками травлення [7] і досліджували під оптичним (Люмам-И3) та атомно-силовим (АСМ “Solver P47-PRO”) мікроскопами. Методом поступового стравлювання зразка у NaOH ми з’ясували, що товщина дефектного примежового шару не перевищує 1 мкм.

Проведено експерименти на зразках з різними способами обробки.

Зразок 1 – зразок, на якому проведено описані вище дослідження R(P).

Зразок 2 – контрольний зразок, вирізаний поряд зі зразком 1, препарування якого було аналогічне зі зразком 1, проте його не піддавали пружній деформації.

Зразок 3 – підготовка цього зразка була такою ж, як і зразків 1 та 2, проте його з плівкою Al обробили в ультразвуковій установці 35 кГц протягом 90 хв (середовище – вода, 60 °C).

Зразок 4 – плівку Al нанесено на зразок за температури 70 °С, після чого його нагріли до 320 °С і охолодили, як і попередні зразки.

Ділянки зразка, на яких нанесено алюмінієву плівку, умовно назвемо ділянками А, а ділянки, на які її не наносили, – ділянками Б.

Усереднені результати густин ямок травлення (N, см$^{-2}$) на оптичному мікроскопі та АСМ наведено в табл. 1 та 2, відповідно.

Таблиця 1

Усереднені результати густин ямок травлення на оптичному мікроскопі

Зразок	1		2		3		4	
Ділянка	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
N, см$^{-2}\times10^{6}$	26,3	13,2	17,6	12,8	26,8	8,6	14,9	7,6

Таблиця 2

Усереднені результати густин ямок травлення на АСМ

Зразок	Ділянка	Діапазон глибин (розмірів) ямок, нм	N, см$^{-2}\times10^{6}$
1	А	80–60	4,6
		59–30	10,2
		29–3	43,4
		Сума	58,1
	Б	80–60	2,6
		59–30	5,6
		29–3	7,4
		Сума	15,6
2	А	80–60	5,4
		59–30	14,0
		29–3	22,0
		Сума	41,4
	Б	80–60	0,9
		59–30	2,2
		29–3	17,5
		Сума	20,5

З табл. 1, 2 бачимо, що густина ямок на ділянках А у 2–3 рази більша, ніж на ділянках Б. Зазначимо, що густина ямок на тих же зразках, наведена в табл. 1, є меншою, ніж наведена в табл. 2. Це пояснюють більшою роздільною здатністю зображень поверхні зразків, зроблених на АСМ. Цей мікроскоп дав змогу виявити той факт, що густина ямок на ділянках А зростає, головно, завдяки дрібним ямкам розмірами 30–3 нм. Очевидно, це є розмір кластерів дефектів, про які йшлося вище.

Густини ямок N на ділянках А зразка 1 на 50 % більша, ніж на ділянках А контрольного зразка 2, тоді як густини ямок травлення на ділянках Б обох цих зразків близькі за значенням. Подібне простежується і на зразку 3, підданому ультразвуковій обробці. Ці результати свідчать про те, що пружна деформація кристала зумовлює генерацію дефектів і прискорює їхню конденсацію в кластери.

Плівки Al та Bi, осаджені на “холодний” *p*-Si (температура підкладки була близько 70 °C), не викликали помітного збільшення дефектності примежового шару кремнію. Очевидно, для виникнення дефектного шару під плівкою металу необхідна двовимірна деформація кристалічної поверхні, що відбувається під час охолодження зразків з плівкою (стиск поверхні Si, зразки 1–3) або їхнього нагрівання (розтяг поверхні – зразок 4 (див. табл. 1)). Відомо [1], що коефіцієнти теплового розширення цих матеріалів помітно відрізняються.

Витримка зразків з алюмінієвою плівкою за кімнатної температури протягом 100 год не викликала помітних змін у дефектності межового шару кремнію, що корелює з описаними вище дослідженнями (див. рис. 2) зміни провідності зразків після тривалої їх витримки за кімнатної температури.

З порівняння між собою N на ділянках Б зразків 1 та 2 в обох таблицях випливає, що густина дефектів на них не дуже відрізняється і є в межах статистичного розкиду. Тому можна припустити, що дефектність самого зразка під час пружної деформації не зазнає помітних змін.

На підставі виявленої кореляції між змінами дефектності примежового з металом шару *p*-Si в ході пружної деформації зразка та відповідними змінами опору зразка, а також відсутності помітних змін дефектності областей Б у пружно деформованому і не деформованому зразках можна зробити висновок, що провідну роль у цих процесах відіграє примежовий дефектний шар кремнію.

---

1. Електрофізичні характеристики приповерхневих шарів кристалів Si *p*-типу з напиленими плівками Al, підданих пружній деформації / Б. Павлик, М. Кушлик, Р. Дідик [та ін.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 2. – С. 57–64.
2. *Савчин В. П.* Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах / В. П. Савчин, Р. Я. Шувар. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 687 с.
3. *Бир Г. Л.* Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках / Г. Л. Бир, Г. Е. Пикус. – М. : Наука, 1972. – 584 с.
4. *Косевич А. М.* Теория кристаллической решётки / А. М. Косевич. – К. : Наукова думка, 1988. – 304 с.
5. Регулярный рельеф на поверхности кремния как геттер структурных дефектов / Л. С. Берман, И. В. Грехов, Л. С. Костина [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 1. – С. 75–80.
6. Характеристика приповерхневих шарів кристалів p-Si з плівками Al / Б. В. Павлик, М. О. Кушлик, Р. І. Дідик [та ін.] // Укр. фіз. журн. – 2013. – Вип. 58, № 3. – С. 205–211.
7. Деякі особливості хімічного травлення поверхонь монокристалічного кремнію / Б. Павлик, Р. Дідик, Й. Шикоряк [та ін.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2011. – Вип. 1. – С. 50–59.
8. Полупроводники / [под. ред. Н. Б. Хеннея]. – М. : Изд-во иностр. л-ры, 1962. – С. 461.

ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2013. Випуск 3

FEATURES OF ELECTRO-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF ELASTICALLY DEFORMED MONOCRYSTALS OF *p*-Si

B. Pavlyk[1], R. Didyk[1], R. Lys[1], D. Slobodzyan[1], A. Hrypa[1], J. Shykoryak[1], M. Kushlyk[1], I. Tshehil[2]

[1] *Ivan Franko National University of Lviv,*
Tarnavskogo Str. 107, UA – 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua
[2] *SPE"Carat", Stryjska Str. 202, UA – 79031 Lviv, Ukraine*

Were investigated changes in the resistance of monocrystalline p-Si sample at room temperature in the process of compression or removal of mechanical deformations. Found that during exposure of the sample with stoped press, resistance of the sample increases. Investigated, that between individual cycles of deformation occurs gradual and prolonged increase in resistance of the sample. Selectively etching of the surface (111) found an increased defectiveness of sites on the surface layer of the sample that was inflicted with film of aluminum. This fact, according to the authors, causes a change in resistance of the sample under uniaxial its elastic deformation.
Key words: surface layer, monocrystalline silicon, uniaxial deformation, ohmic contacts.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОДЕФОРМИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ *p*-Si

Б. Павлык[1], Р. Дидык[1], Р. Лыс[1], Д. Слободзян[1], А. Грыпа[1], И. Шикоряк[1], М. Кушлык[1], И. Чегиль[2]

[1] *Львовский национальный университет имени Ивана Франко*
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017, Львов, Украина
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua
[2] *НПП "Карат", ул. Стрийская, 202, 79031, Львов, Украина*

Исследовано изменение сопротивления монокристаллического образца *p*-Si при комнатной температуре в процессе его сжатия или снятия механической нагрузки. Выявлено, что во время выдержки исследуемого образца при остановленном прессе сопротивление образца увеличивается. Обнаружено, что между отдельными циклами деформации сопротивление образца возрастает. Селективным травлением поверхности (111) выявлено повышенную дефектность участка приповерхностного слоя образца, на который была нанесена плёнка алюминия. По мнению авторов, этот факт определяет изменение сопротивления образца при одноосной упругой деформации.

Ключевые слова: приповерхностный слой, монокристаллический кремний, одноосная деформация, омические контакты.

Стаття надійшла до редколегії 22.02.2013
Прийнята до друку 13.03.2013