

## КРЕМНІЄВІ $p$ -МОН ТА $n$ -МОН ТРАНЗИСТОРИ З ОДНОВІСНО ДЕФОРМОВАНИМИ КАНАЛАМИ У НАНОТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

А.Є. ГОРІН,<sup>1</sup> Г.В. ГРОМОВА,<sup>2</sup> В.М. ЄРМАКОВ,<sup>1</sup> П.П. КОГУТЮК,<sup>2</sup>  
В.В. КОЛОМОЄЦЬ,<sup>1</sup> П.Ф. НАЗАРЧУК,<sup>3</sup> Л.І. ПАНАСЮК,<sup>1</sup>  
С.А. ФЕДОСОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
(Просп. Науки, 41, Київ 03028; e-mail: ekol@isp.kiev.ua)

<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Т. Шевченка  
(Вул. Володимирська, 61, Київ 01601; e-mail: pavlo@mail.univ.kiev.ua)

<sup>3</sup>Волинський національний університет ім. Лесі Українки  
(Просп. Воли, 13, Луцьк 263018; e-mail: tll@ukr.net)

УДК 538.915  
©2011

Розглянуто вплив одновісного тиску на рухливість носіїв струму у кристалах  $n$ -Si та  $p$ -Si, який використовується при виготовленні  $n$ -МОН та  $p$ -МОН транзисторів. Представлено залежності поздовжнього і поперечного тензорезистивних (ТР) ефектів, отримано у кремнії  $p$ -типу для головних кристалографічних орієнтацій  $X \parallel [100]$ ,  $X \parallel [110]$ ,  $X \parallel [111]$ . Стрімке зменшення поздовжнього ТР ефекту в  $p$ -Si зі збільшенням тиску пов'язано із зменшенням поздовжньої ефективної маси важких дірок і відповідним збільшенням їх рухливості при зростанні  $X$ . У кремнії  $n$ -типу зі збільшенням одновісного тиску  $X \parallel [100]$  відбувається повне усунення  $f$ -переходів з міждолинного розсіювання при великому енергетичному розщепленні однотипних  $\Delta_1$ -долин ( $\Delta\epsilon > 10$  kT), що веде до зростання при цьому рухливості електронів у температурному інтервалі 78–300 К. На величину рухливості електронів у цьому температурному інтервалі зміна  $g$ -переходів при розщепленні однотипних  $\Delta_1$  долин не впливає. Крім того, наведено технологічні розробки, які використовує фірма "Intel Corporation" при виробництві інтегральних мікросхем з одновісно-деформованими каналами МОН транзисторів.

### 1. Вступ

Рухливість носіїв струму, як відомо, визначає насамперед такі важливі параметри транзисторів, як крутизну вольт-амперних характеристик (ВАХ) та граничну частоту їх перемикання [1,2]. Оскільки на сьогоднішній день кремній є основним матеріалом для виробництва інтегральних мікросхем, розглянемо як у кремнії використовується для збільшення рухливості носіїв струму (дірок та електронів) одновісна деформація. Для цього представлено залежності поздовжнього та поперечного ТР ефектів, які отримані для всіх головних кристалографічних напрямків

в  $p$ -Si ( $X \parallel [100]$ ,  $X \parallel [110]$ ,  $X \parallel [111]$ ) та для кристалографічного напрямку  $X \parallel [100]$  у  $n$ -кремнії, за якого відбувається повне зняття з міждолинного розсіювання  $f$ -переходів у випадку сильних одновісних тисків. Окрім цього буде наведено механізми, які відповідають за ті чи інші закономірності ТР ефектів, та вказано можливості досягнення подальшого зростання рухливості за рахунок одновісного пружного деформування каналів  $p$ -МОН та  $n$ -МОН кремнієвих транзисторів.

### 2. Експериментальні результати та їх обговорення

На основі експериментальних даних з'ясуємо наслідки впливу сильної одновісної деформації кристалів  $p$ -Si та  $n$ -Si.

Для  $p$ -Si, при різній орієнтації тиску  $X$  відносно головних кристалографічних напрямків, представлено залежності питомого опору кристалів від одновісного тиску, тобто поздовжній та поперечний тензорезистивний ефекти (рис. 1–3) [3]. У випадку поздовжнього ТР ефекту для всіх орієнтацій маємо зменшення питомого опору кристалів із збільшенням тиску, яке зумовлене зменшенням ефективної маси важких дірок, що і приводить до збільшення їх рухливості у напрямку одновісної деформації. Ефективна маса дірок змінюється за рахунок перебудови валентної зони (рис. 4) під впливом сильного одновісного тиску [4]. Деформовані ізоенергетичні сфери у недеформованому  $p$ -кремнії перетворюються під впливом сильного одновісного тиску у сплюснений еліпсоїд (у зоні важких дірок) та у витягнутий еліпсоїд (в зоні легких дірок).

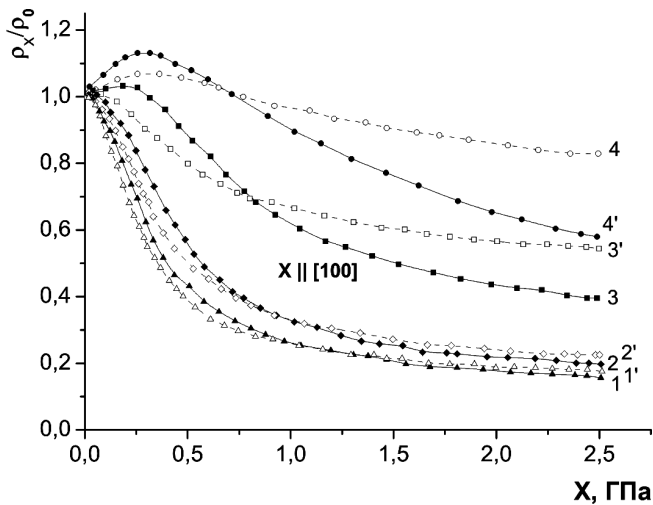


Рис. 1. Залежності  $\rho_x/\rho_0$  від одновісного тиску  $X \parallel [100]$  для *p*-Si(B) при різних концентраціях домішки бору ( $\text{м}^{-3}$ ): 1 –  $N_B = 4,8 \cdot 10^{18}$ , 2 –  $2,5 \cdot 10^{19}$ , 3 –  $9,1 \cdot 10^{21}$ , 4 –  $2,3 \cdot 10^{22}$ .  $T = 78$  К. Штрихові криві – для  $X \parallel [100] \perp E$ , суцільні криві – для  $X \parallel [100] \parallel E$

Зовсім інша причина збільшення рухливості електронів спостерігається в одновісно деформованих кристалах *n*-кремнію. Тут необхідно розглянути відносний внесок у міждолинне розсіювання *f*-переходів та *g*-переходів. Дані вимірювань як поздовжнього при  $X \parallel [100] \parallel E$ , так і поперечного тензорезистивного ефекту при  $X \parallel [100] \perp E$  (рис. 5) однозначно довели вирішальну роль *f*-переходів та незначну роль *g*-переходів у міждолинному розсіюванні у температурному інтервалі 100–300 К. Саме завдяки цьому при сильних тисках  $X \parallel [100]$  та  $T = 300$  К, коли повністю знімаються *f*-переходи з міждолинного розсіювання (в умовах, коли  $\Delta\varepsilon > 10$  кТ), у кремнії рухливість електронів зростає за рахунок безпосереднього зменшення розсіювання електронів. Вирішальний внесок у міждолинне розсіювання *f*-переходів при сильних одновісних тисках вперше було продемонстровано на температурних залежностях поздовжнього ТР ефекту в *n*-кремнії у роботі [5]. Більше 30 років пройшло до практичного впровадження фірмою “Intel” цього фундаментального відкриття у настільки масштабному варіанті.

Сильні тиски ( $X > 5$  ГПа) в одновісно деформованому *n*-Si у напрямку [111] приводять до переходу метал–неметал, який зумовлений квадратичним зростанням ефективної маси електрона з тиском. Щоб описати залежність ефективної маси від тиску, ми застосували таке співвідношення. Відомо, що в області переходу метал–неметал залежність провідності ви-

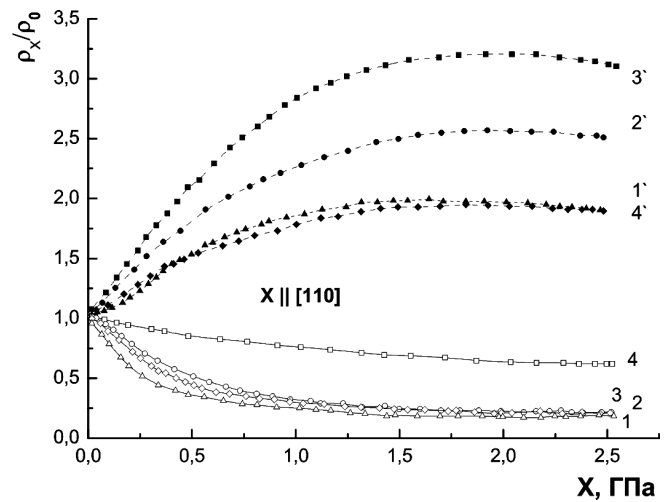


Рис. 2. Залежності  $\rho_x/\rho_0$  від одновісного тиску  $X \parallel [110]$  для *p*-Si(B) при концентраціях домішки бору ( $\text{м}^{-3}$ ): 1 –  $N_B = 4,8 \cdot 10^{18}$ , 2 –  $2,5 \cdot 10^{19}$ , 3 –  $9,1 \cdot 10^{21}$ , 4 –  $3,1 \cdot 10^{24}$ .  $T = 78$  К. Штрихові криві відповідають випадку  $X \parallel [110] \perp E$ , а суцільні криві відповідають випадку  $X \parallel [110] \parallel E$

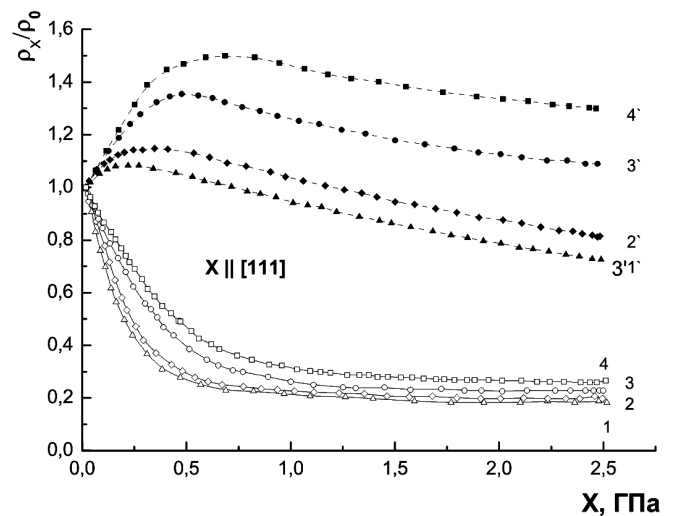


Рис. 3. Залежності  $\rho_x/\rho_0$  від одновісного тиску  $X \parallel [111]$  для *p*-Si(B) при різних концентраціях домішки бору ( $\text{м}^{-3}$ ): 1 –  $N_B = 4,8 \cdot 10^{18}$ , 2 –  $2,5 \cdot 10^{19}$ , 3 –  $9,1 \cdot 10^{21}$ , 4 –  $2,3 \cdot 10^{22}$ .  $T = 78$  К. Штрихові криві відповідають випадку  $X \parallel [111] \perp E$ , а суцільні криві відповідають випадку  $X \parallel [111] \parallel E$

родженого напівпровідника визначається співвідношенням

$$\sigma_x = \sigma_0 [n/n_c(x)]^\gamma, \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація домішок виродженого напівпровідника,  $n_c(X)$  – критична концентрація переходу метал–неметал, яка залежить від одновісного тиску

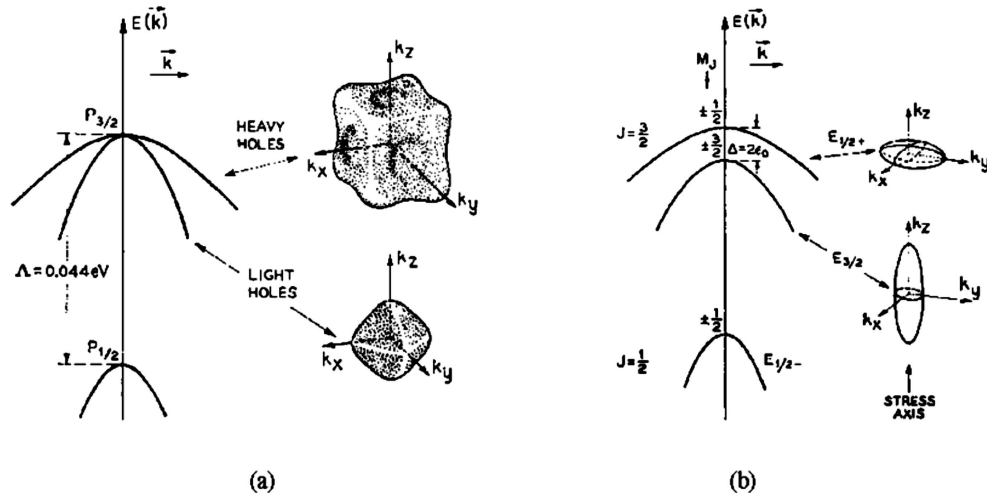


Рис. 4. Структура валентної зони для недеформованих кристалів кремнію та германію (а), в одновісно деформованих кристалах кремнію та германію (b)

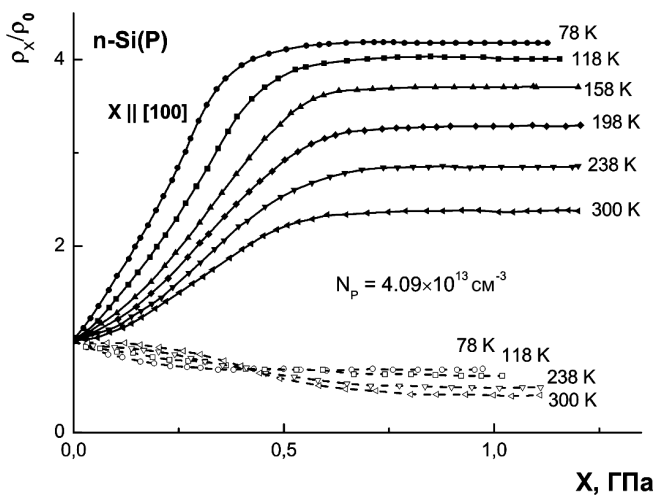


Рис. 5. Залежності  $\rho_x/\rho_0$  від одновісного тиску  $X \parallel [100]$  для  $n\text{-Si(P)}$  при різних температурах. Суцільні криві відповідають залежностям  $X \parallel [100] \parallel E$ , а штрихові криві відповідають залежностям  $X \parallel [100] \perp E$

та може бути наведена у вигляді [6]:

$$n_c(X) = n_c(0)(m_x^*/m_0^*)^3. \quad (2)$$

Розкладемо залежність ефективної маси  $m^*$  електрона від тиску у ряд по тиску:

$$m_x^* = m_0^*(A + BX + CX^2 + \dots). \quad (3)$$

Обмежившись лінійною та квадратичною складовими даної залежності й підставивши таку нелінійну залежність (зумовлену зняттям виродження енергетичних зон на краю зони Бріллюена) у вираз (2),

одержимо зі співвідношення (1):

$$\sigma_x = \sigma_0 \left[ \frac{n}{n_c(0)(A + BX + CX^2)^3} \right]^\gamma, \quad (4)$$

де  $A = n/n_c$ ,  $B, C$  – підгоночні параметри,  $\gamma$  – параметр, визначений із достатньою точністю у низці робіт, наприклад, [7]. Порівнявши експериментальні дані з відповідною залежністю  $\sigma_x$  від тиску (4) (тільки для області металеві провідності) ми знайшли, що у сильно вироджених кристалах залежність ефективної маси від тиску визначається виключно квадратичним членом. Зауважимо, що врахування лише квадратичної залежності зміни ефективної маси електрона у кремнії при  $X \parallel [111]$  відповідає за перехід метал-ізолятор у вироджених кристалах при подальшому зростанні  $X$  та при  $T \rightarrow 0$ .

Сильні одновісні тиски дозволили нам також визначити механізми тензорезистивних ефектів у нейтронно-легованому кремнії. Встановлено, що особливості поздовжнього ТР ефекту пов'язані з технологічними термодонорами, які неодмінно з'являються в об'ємі кристалів при технологічному відпалі кристалів (2 год,  $T \approx 800$  °C). Тому кристали нейтронно-легованого кремнію слід позначати як Si(P, ТД), оскільки термодонори визначають більшість властивостей таких кристалів та кардинально міняють їх температурні залежності опору (провідності). Якщо для порівняно чистих кристалів, легованих домішкою фосфору з розплаву, температурна залежність опору визначається у температурному діапазоні 78–300 К металевим типом провідності (опір зростає із збільшенням температури), то для анало-

гічних кристалів кремнію, легованих фосфором методом нейтронного легування, опір суттєво зменшується із збільшенням температури у тому самому діапазоні температур (типова залежність для напівпровідника). Звичайно, що при цьому змінюються також і холлівські параметри кристалів. Крім цього, як вже зазначали, якісно змінюються, насамперед, тензорезистивні властивості кристалів кремнію, нейтронно-леговані домішкою фосфору.

### 3. Нанотехнології фірми “Intel Corporation”, які використовуються при виробництві інтегральних мікросхем з одновісно деформованими каналами МОН транзисторів

Технологічно і конструктивно зазначеної перебудови валентної зони і зони провідності в умовах сильних одновісних тисків досягнуто так. На підкладку з кремнію наносять епітаксією проміжний шар  $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$  або  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , далі також епітаксією наноситься шар кремнієвого каналу, який буде піддаватися деформації стиску або розтягу, величину якої можна змінювати зміною складу проміжних шарів.

Розглянемо, як фірма “Intel” планує перехід із 90 нм на 65 нм і надалі до 45 нм та 32 нм технології. Спочатку з’ясуємо, що і як буде залишатись в новій технології від старої. Перш за все, залишаються 300 мм пластини кремнію для підкладок. Залишиться, насамперед, і літографічне обладнання, яке використовувалось для 90 нм технології. Тобто, лишається літографічне обладнання з 193 нм аргон-фторидними лазерами, яке використовувалось раніше для виготовлення 90 нм чипів. Технологія непогано зарекомендувала себе з 90 нм техпроцесом і може бути використана з 65 нм з деякою доробкою матеріалу фоторезисту. Беручи до уваги, що до практичного впровадження літографії екстремального ультрафіолету ще далеко, “Intel Corporation” використовує обладнання і технології, які вже непогано зарекомендували себе у попередніх технологічних процесах.

Тепер з’ясуємо, які переваги дає технологія одновісно деформованого кремнію, яка вперше і в повному обсязі використовується фірмою “Intel”. Канал польового *p*-МОН транзистора піддається одновісній деформації стиску за допомогою твердого розчину  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , нанесеного епітаксією навпроти каналу у витравлені заглиблення, а деформація розтягу у каналі *n*-МОН-транзистора створюється за допомогою розтягуючої плівки з силіциду нікелю, нанесеної епітаксією поверх затвору транзистора. При кімна-

тній температурі це приводить майже до двократно-го збільшення рухливості електронів. Збільшення рухливості дірок (також при кімнатній температурі та при одновісному тиску  $\approx 600$  МПа) становить 40%.

Внаслідок використання одновісної деформації кремнію та переходу на 65 нм технології вдається покращити один з найбільш критичних параметрів сучасного процесора – струм витоку транзистора. Завдяки таким заходам спостерігається майже чотирикратне зменшення струму витоку.

Також за рахунок зменшення до 35 нм довжини затвору і товщини шару окислу до 1,2 нм вдалося знизити ємність затвору приблизно на 20%, за рахунок чого збільшується частота перемикання приблизно в 1,4 раза, зменшується і активне енергоспоживання чипу.

Перехід з 90 нм до 65 нм технологічного процесу забезпечує вдвічі більш щільніше розташування транзисторів на тій же площі. Така сама тенденція зберігатиметься і при переході до 45 нм і надалі до 32 нм техпроцесу. Так, на площі в 100 мм<sup>2</sup> при переході до 45 нм технології буде розміщуватись мільярд транзисторів, а на тій же площі при переході до 32 нм технології буде розміщуватись два мільярди транзисторів.

У низку головних проблем оптимізації роботи транзисторів поставлено також енергозбереження у роботі чипів. Основним методом енергозбереження у фірмі “Intel Corporation” є застосування так званих “сплячих транзисторів”. Цілі блоки пам’яті, що не використовуються у даний момент, повністю відключаються від електропостачання. В результаті використання такого методу струм витоку зменшується приблизно у три рази.

Таким чином, можна вважати, що нині маємо добу одновісно деформованого кремнію, що супроводжується підвищенням рухливості носіїв струму (електронів та дірок) і дозволяє відчутно покращити головні характеристики приладів. І доти, доки в технології виробництва приладів буде використовуватись кремній, буде використовуватись і технологія одновісно деформованих каналів кремнієвих *p*-МОН та *n*-МОН транзисторів.

Крім цього, слід зазначити, що у технології одновісно деформованих каналів транзисторів застосовуються епітаксійні технології. Можна вважати що вся нанотехнологія одновісно деформованого кремнію побудована на епітаксії, яка дозволяє одержувати досконалі шари напівпровідникових матеріалів, їх сплавів та структур.

Також подібну технологію одновісної деформації каналів *n*-МОН та *p*-МОН транзисторів використовуємо у структурах напівпровідник на ізоляторі [8]. Одновісна деформація розтягу та стиску каналів таких транзисторів буде здійснюватись за рахунок нанесених епітаксією у витравленні навпроти каналів заглиблення сплавів  $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$  або  $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ , відповідно, для одновісної деформації розтягу та одновісної деформації стискання.

#### 4. Висновки

У даній роботі визначено механізми вимірних поздовжніх та поперечних ТР ефектів як в *p*-Si (для головних кристалографічних напрямків  $X\parallel[100]$ ,  $X\parallel[110]$ ,  $X\parallel[111]$ ), так і в *n*-Si (для кристалографічного напрямку  $X\parallel[100]$ ).

Механізми у *p*-Si пов'язані з перебудовою валентної зони під впливом одновісного тиску, який приводить до перетворення деформованих ізоенергетичних сфер (у недеформованих кристалах) у еліпсоїдальні ізоенергетичні поверхні, які формуються при сильних одновісних тисках. Внаслідок великої анізотропії цих ізоенергетичних поверхонь наявна сильна анізотропія поздовжнього ТР ефекту відносно поперечного ТР ефекту, що і дозволяє нам виявити напрямки, які визначають збільшення рухливості важких дірок за рахунок суттєвого зменшення їх ефективної маси вздовж напрямку тиску.

У *n*-Si при сильних одновісних тисках  $X\parallel[100]$ , при яких повністю знімаються *f*-переходи, збільшується безпосередньо рухливість електронів, що приводить до відносного збільшення рухливості у випадку поздовжнього ТР ефекту та до абсолютного збільшення рухливості у випадку поперечного ТР ефекту. При цьому величина ефективної маси електрона змінюється від  $m_c = 3m_0/2K_m + 1 = 0,26m_0$ , де  $K_m$  – параметр анізотропії ефективної маси, до  $m_i^* = 0,91m_0$  (для поздовжнього ТР ефекту) та до  $m_{\perp}^* = 0,19m_0$  (для поперечного ТР ефекту). Тобто у випадку поперечного ТР ефекту маємо абсолютне збільшення рухливості електронів.

У роботі наведено результати технологічних розробок, які використовує “Intel Corporation” для одержання одновісного тиску у каналах *p*-МОН та *n*-МОН транзисторів. Використовуються при цьому епітаксійні технології, які дозволяють одержати досконалі шари сплавів різних напівпровідників ( $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$ ,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ) та структур напівпровідник на ізоляторі.

Слід додати, що лише при сильному одновісному тиску вдається одержати таке досить значне збіль-

шення рухливості носіїв струму ( $\approx 40\%$  – для дірок у *p*-МОН транзисторах та  $\approx 200\%$  – для електронів у *n*-МОН транзисторах) при значеннях тиску (600–700) МПа, тоді як ні біаксіальна деформація, ні гідростатичний тиск не приводять до відчутних змін рухливості носіїв струму.

Наведено переваги методу сильних одновісних тисків, які реалізуються за допомогою оригінальної установки [9], перед методом слабких одновісних тисків (п'єзоопір Сміта [10]).

Слід також відзначити, що користуючись методом сильних одновісних тисків, ми визначили більше ніж 15 параметрів тільки для зони провідності кремнію та германію, також фундаментальних, знайдених вперше (наприклад, параметри  $\Delta_1$  долин С-зони германію).

1. S.T. Thompson *et al.*, IEDM Tech. Dig 61 (2002)
2. T. Ghana *et al.*, IEDM Tech. Dig 978 (2003).
3. В.Н. Єрмаков, А.В. Федосов, В.В. Коломоєць, А.Є. Горін, Нові технології **20**, 48 (2008).
4. Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус., *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (Изд. Наука, Москва, 1971).
5. П.И. Баранский, И.В. Даховский, В.В. Коломоєць, А.В. Федосов, ФТП **10**, 1480 (1976).
6. S.I. Budsulyak, A.E. Gorin, V.M. Ermakov, V.V. Kolo-moets *et al.*, Phys. stat. sol. (b) **223**, 519 (2001).
7. M.A. Paalanen, T.F. Rosenbaum, G.A. Thomas, and R.N. Bhatt, Phys. Rev. Lett. **48**, 1284 (1982).
8. C. Urban, C. Sandow, Q.T. Zhao, and S. Mantl, in *X Intern. Conf. on Ultimate Integration of Silicon, Aachen, Germany* (2009), p. 65.
9. В.В. Коломоєць, Б.А. Сусь, В.Н. Єрмаков, В.Е. Родионов, (Патент России N2040785, 1995).
10. C.S. Smit, Phys. Rev. **94**, 42 (1954).

Одержано 13.04.11

#### КРЕМНИЕВЫЕ *p*-МОП И *n*-МОП ТРАНЗИСТОРЫ С ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННЫМИ КАНАЛАМИ В НАНОТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

А.Е. Горин, Г.В. Громова, В.Н. Єрмаков, П.П. Козутюк, В.В. Коломоєць, П.Ф. Назарчук, Л.И. Панасюк, С.А. Федосов

#### Резюме

В работе приведены зависимости от одноосного сжатия  $X$  до значений 2,5 ГПа продольного и поперечного тензорезистивных (ТР) эффектов, измеренных в кремнии *p*-типа, легированного примесью бора для главных кристалографических направлений:  $X\parallel[100]$ ,  $X\parallel[110]$ ,  $X\parallel[111]$ . Уменьшение величины

продольного ТР эффекта в  $p$ -кремнии с увеличением одноосного давления в области небольших значений механического напряжения связано со значительным уменьшением величины продольной эффективной массы тяжелых дырок и, соответственно, с увеличением их подвижности. В кремнии  $n$ -типа увеличение подвижности электронов с увеличением одноосного давления  $X \parallel [100]$  определяется полным снятием  $f$ -переходов из междолинного рассеяния (при сильных одноосных давлениях, когда  $\Delta\varepsilon > 10$  кТ, где  $\Delta\varepsilon$  расщепление по энергии  $\Delta_1$ -долин) и возрастанием при этом их подвижности в температурном интервале 78–300 К. На изменение подвижности электронов в этом температурном интервале изменение с одноосной деформацией  $g$ -переходов вследствие расщепления  $\Delta_1$ -долин не влияет.

SILICON  $p$ -MOS AND  $n$ -MOS TRANSISTORS  
WITH UNIAXIALLY STRAINED CHANNELS  
IN ELECTRONIC DEVICE NANOTECHNOLOGY

*A.E. Gorin<sup>1</sup>, G.V. Gromova<sup>2</sup>, V.M. Ermakov<sup>1</sup>, P.P. Kogoutyuk<sup>2</sup>,  
V.V. Kolomoets<sup>1</sup>, P.F. Nasarchuk<sup>3</sup>, L.I. Panasjuk<sup>1</sup>,  
S.A. Fedosov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,  
Nat. Acad. of Sci. of Ukraine  
(41, Prosp. Nauky, Kyiv 03028, Ukraine;  
e-mail: ekol@isp.kiev.ua),

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv  
(64, Volodymyrs'ka Str., Kyiv 01033, Ukraine;  
e-mail: pavlo@mail.univ.kiev.ua),

<sup>3</sup>Lesya Ukrainka Volyn National University  
(13, Prosp. Voli, Lutsk 263018, Ukraine;  
e-mail: tll@ukr.net)

S u m m a r y

The effect of uniaxial stress on the mobility of charge carriers in  $n$ -Si and  $p$ -Si crystals used for the fabrication of  $n$ -MOS and  $p$ -MOS transistors is considered. The stress dependences of the longitudinal and transverse tensorial effects in  $p$ -Si obtained for the principal crystallographic orientations ( $X \parallel [100]$ ,  $X \parallel [110]$ , and  $X \parallel [111]$ ) are presented. An abrupt decrease of the longitudinal tensorial effect in  $p$ -Si with increasing stress is due to a reduction of the longitudinal effective mass of heavy holes and the corresponding rise of their mobility. In  $n$ -Si, a growth of the uniaxial stress  $X \parallel [100]$  results in the complete removal of  $f$ -transitions from intervalley scattering under a large energy splitting of single-type  $\Delta_1$ -valleys ( $\Delta\varepsilon \gtrsim 10$  kT), which leads to an increase of the electron mobility in the temperature range 78–300 K. The change of  $g$ -transitions under the splitting of single-type  $\Delta_1$  valleys in this temperature interval has no effect on the electron mobility. We also describe technological developments used by “Intel Corporation” for the fabrication of integrated circuits with uniaxially strained channels of MOS transistors.