

М.А. Глауберман, О.А. Кулініч, В.В. Єгоров, Н.А. Каніщева, В.В. Козел

## Вплив структурних дефектів у приповерхневих шарах кремнію на перетворювальні властивості інжекційно-інверсійної магніточутливої структури

Навчально-науково-виробничий центр при Одеському національному університеті ім. І.І. Мечникова,  
вул. Маршала Говорова 4, м. Одеса, 65063, Україна, E-mail: [mag@farlep.net](mailto:mag@farlep.net)

За допомогою сучасних методів дослідження визначено вплив структурних недосконалостей, домішкового складу і неоднорідностей легування на основні параметри відповідальні за чутливість інжекційно-інверсійної магніточутливої структури.

Досліджувались пластини вихідного монокристалевого кремнію, а також структури оксид-кремній.

Встановлено, що у більшості випадків основними домішками в вихідному кремнії, а також у пластинках кремнію, після зняття оксиду, є кисень і вуглець. Кисень при цьому проявляє електричну активність і, таким чином, впливає на параметри структурних дефектів, які, в свою чергу, впливають на рухливість і магніточутливі властивості досліджуваної структури.

**Ключові слова:** дефекти, кремній, кисень, магніточутлива структура, рухливість.

Стаття постуила до редакції 02.10.2003; прийнята до друку 19.11.2003.

Однією з очевидних можливостей покращення параметрів та розширення функціональних можливостей магніточутливих структур при їх практичному застосуванні є штучне комбінування в структурі різних електронних ефектів технологічним шляхом. Розроблена нами інтегрально інжекційно-інверсійна магніточутлива структура (ПМС) отримана в результаті заміни в структурі двоколекторного магнітотранзистора (ДМТ) колекторних областей на пару МДН-транзисторів SGD, підкладкою котрих є базовий кристал структури (рис. 1). В отриманій таким чином структурі управління стоковими струмами МДН-транзисторів здійснюється холлівським потенціалом також по затвору, завдяки гальванічному зв'язку між їх затворами і базовою пластиною. При цьому необхідна для індукціонування каналів напруга створюється розподіленним в базі потенціалом прискорюючого поля. Для регулювання цієї напруги в структурі передбачений додатковий р-п-перехід AG, який підтримується під зворотнім зміщенням та розташований між підкладками МДН-транзисторів і місцями їх підключення до бази. Цей перехід складає з базовою структурою польовий транзистор з керуванням р-п-переходом, завдяки чому з'являється можливість електричного регулювання опору прилеглої до переходу ділянки бази і, таким чином, падіння напруги на ній. Важливою розрізнявальною можливістю ПМС є наявність емітера [2], що зумовлює дію в ній нового механізму

магніточутливості – зміну стокових струмів МДН-транзисторів за рахунок перерозподілу в базі концентрації інжектованих носіїв під впливом магнітного поля.

ПМС виготовлялись за допомогою стандартних методів технології інтегральних схем, включаючи МОН-технологію. Однак структурні та домішкові дефекти, їх розподіл в пластинках напівпровідників здійснюють вирішальний вплив на перетворювальні можливості ПМС і, таким чином, на процент виходу готових приладів.

Метою даної роботи є встановлення зв'язку між магніточутливістю ПМС та структурним (домішковим) складом вихідного кремнію, так і проміжних структур і готових приладів. А також встановлення залежності параметрів структурних дефектів від виду та концентрації домішки.

Однією з важливих характеристик будь якого датчика є його відносна чутливість, яка для ПМС визначається як:

$$S = S_B + S_G + S_p, \quad (1)$$

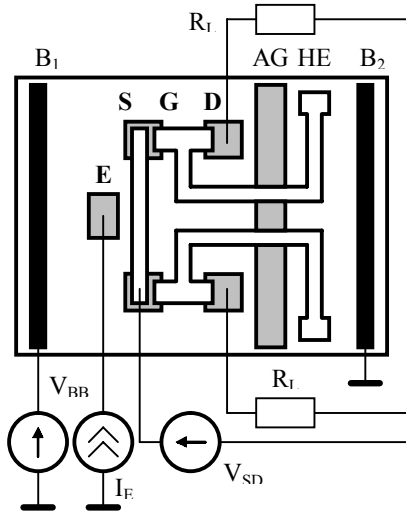
де

$$S_B = I_D^{-1} \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_B} \cdot \frac{dV_B}{dB} \Big|_{B=0}, \quad (2)$$

при керуванні по підкладці;

$$S_G = I_D^{-1} \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \cdot \frac{dV_G}{dB} \Big|_{B=0}, \quad (3)$$

при керуванні по затвору;



**Рис. 1.** Конструкція та підключення інжекційно-інверсійної магніточутливої структури. S, G, D – відповідно витік, затвор, стік МДН-транзисторів; AG – додатковий затвор; B<sub>1</sub> і B<sub>2</sub> – базові контакти; E – емітер; HE – холлівські електроди; R<sub>L</sub> – навантажувальні опори.

$$S_p = I_D^{-1} \cdot \frac{\partial I_D}{\partial p_B} \cdot \left. \frac{dp_B}{dB} \right|_{B=0}, \quad (4)$$

при керуванні перерозподілом концентрацій. I<sub>D</sub> – струм стоку в передпороговому режимі описується виразом [1,2]:

$$I_D = \Omega \times \left\{ (\beta V_G + 1) \cdot (\beta \phi_{sl} - \beta \phi_{s0}) - \frac{1}{2} [(\beta \phi_{sl})^2 - (\beta \phi_{s0})^2] - A \frac{2}{3} [(\beta \phi_{sl} - \beta V_B - 1)^{3/2} - (\beta \phi_{s0} - \beta V_B - 1)^{3/2}] + A [(\beta \phi_{sl} - \beta V_B - 1)^{1/2} - (\beta \phi_{s0} - \beta V_B - 1)^{1/2}] \right\} \quad (5)$$

де  $\Omega = (h_c / L_c)(\mu_c C_{ox} / \beta^2)$ ; h<sub>c</sub> і L<sub>c</sub> – відповідно ширина і довжина каналу МДП-транзистора; μ<sub>c</sub> – ефективна рухливість дірок в каналі, C<sub>ox</sub> – питома ємність діелектрика (розрахована на одиницю поверхні); β ≡ φ<sub>T</sub><sup>-1</sup> – зворотній температурний потенціал; A = √2eNβ L<sub>n</sub>/C<sub>ox</sub> – константа МДН-структури; N – концентрація легуючої домішки в підкладці; L<sub>n</sub> = (εε<sub>0</sub>/eNβ)<sup>1/2</sup> – дебаєвська довжина для об'єму підкладки; ε<sub>0</sub> – електрична стала; ε – відносна діелектрична проникність напівпровідника. Поверхневий потенціал каналу в області стоку приймався рівним потенціалу насичення φ<sub>sat</sub>, який визначається виразом [1]

$$\beta V_G - \beta \phi_{sat} = A (\beta \phi_{sat} - 1)^{1/2}. \quad (6)$$

Аналізуючи вираз для відносної магніточутливості ПМС можна відзначити, що h<sub>c</sub>, L<sub>c</sub> і C<sub>ox</sub> визначаються геометричними розмірами структури і добре контролюються та відтворюються, а вплив точкових і структурних дефектів зводиться в основному до зміни ефективної рухливості дірок в каналі МДН транзистора.

В загальному випадку рухливість ε

суперпозицією декількох рухливостей: μ<sub>gf</sub>, яка враховує розсіювання носіїв зарядів на фонах; μ<sub>gd</sub> – визначає розсіювання носіїв зарядів на дефектах; крім того, вважаючи, що процеси переносу носіїв зарядів в каналі мають місце на відстані меншій ніж дебаєвська довжина розсіювання, від поверхні межі розподілу оксид-кремній, необхідно також мати на увазі можливість розсіювання носіїв зарядів від межі розподілу – μ<sub>gs</sub>.

Таким чином, якщо не враховувати „інтерференцію” процесів розсіювання, вираз для результуючої рухливості має вигляд:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{gf}} + \frac{1}{\mu_{gd}} + \frac{1}{\mu_{gs}}. \quad (7)$$

Якщо фонна частина рухливості досліджена добре (наприклад, для р-кремнію становить 0,048 ± 0,0015 м<sup>2</sup>/(В·с) [5], то розсіювання на структурних дефектах вивчено недостатньо. Розглянемо яким чином структурні та інші дефекти і домішки можуть вплинути на μ<sub>gd</sub>.

Об'єктами дослідження були пластини монокристалічного високоомного кремнію р-типу, проміжні структури після основних технологічних операцій, готові ПМС структури з товщиною підзатворного оксиду 0,14 ± 0,02 мкм.

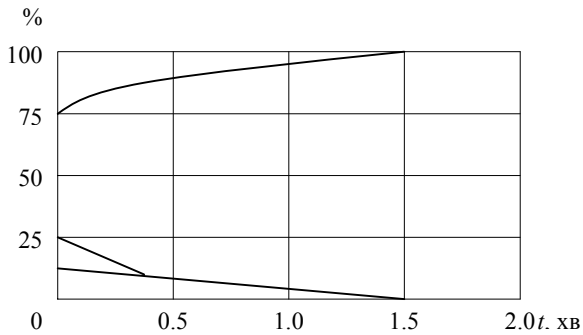
Для виявлення структурної недосконалості проводилась обробка поверхні пластин селективними травниками: Секко для зразків з орієнтацією (100) та Сіртля для зразків з орієнтацією (111), з попередньою обробкою в складі Каро і перекисноаміачному розчині [3,4].

Для досліджень поверхні кремнію після хімічних обробок використані наступні методи та обладнання:

- Оже-електронна спектроскопія (ЕОС) – спектрометр LAS-3000 (фірма “Riber”);
- електронна скануюча спектроскопія (РЕМП) – електронний скануючий мікроскоп-аналізатор “Cam-Scan”-4D з системою енергетичного дисперсійного аналізатора “Link-860”;
- вторинна іонна маспектрометрія (ВІМС) – Camesa-3F;
- виміри ВФХ та ВАХ – спеціально розроблені характеристики графі.

Оптичні методи досліджень за допомогою металографічного мікроскопа ММР-2Р.

Відомо, що для виготовлення ПМС застосовують високотемпературні процеси легування, що призводить, згідно з законом Веґарда до виникнення додаткових механічних напруг, які перевищують поріг пластичної текучості і, як наслідок, до створення розвинутої дислокаційної структури у вигляді сіток дислокацій, яка складається з повних крайових дислокацій та часткових дислокацій Шоклі-Ріда. Спостерігалась поява 60° крайових дислокацій у вигляді сіток дислокацій. Біля ядер дислокацій, внаслідок присутності, так званих, “обірваних” чи “ненасичених” зв'язків, формується область просторового заряду, на якій відбувається розсіювання носіїв зарядів. Ці зв'язки створюють в р-кремнії донорні рівні поблизу середини забороненої зони. Таким чином, наявність дислокацій з крайовою



**Рис. 2.** Результати розрахунків спектрів ЕОС домішок в районі дефектів шаруватої неоднорідності.

межею впливає як на концентрацію, так і на загальну рухливість носіїв зарядів. Згідно з загальновідомим виразом,  $\mu_{gd}$  можна записати у вигляді:

$$\mu_{gd} = \frac{e \langle \tau \rangle}{m^*}; \quad \langle \tau \rangle = \frac{3}{8RNv}; \quad (8)$$

де:  $m^*$  – ефективна маса носіїв зарядів;  
 $R$  – радіус просторового заряду дислокацій;  
 $N$  – щільність дислокацій;  
 $v$  – швидкість розсіяних електронів;  
 $e$  – заряд електрона.

Радіус просторового заряду дислокацій визначається як:

$$R = (f / \pi c N_{a,d})^{1/2}, \quad (9)$$

де:  $c = |bI| / \sin \alpha$  – середня відстань між „ненасиченими” валентними зв’язками;  $|bI|$  – модуль вектору Бюргерса;  $\alpha$  – кут Бюргерса (для крайової 60-градусної дислокації  $c \approx 5 \cdot 10^{-10}$  м);  $N_{a,d}$  – концентрація легуючої домішки;  $f$  – функція заповнення ненасичених зв’язків, яка має вигляд

$$f = \left[ 1 + \frac{1}{g} \left( \exp \frac{E_D - E_f}{kT} \right) \right]^{-1},$$

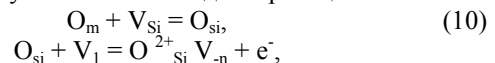
$E_D$  – положення дислокаційних донорних рівнів в р-кремнії;  $g$  – статистичний фактор.

Розрахунки показують, що для рівня  $E_D = (E_V + 0,6) \text{ eV}$  [8] і  $f = 0,05$ ,  $R = 0,046$  мкм. Тоді при щільності дислокацій  $N = 10^{12} \text{ м}^{-2}$ ,  $m^* = 0,56 m_0$  та  $v = 1,56 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ ,  $\mu_{gd} = 17 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Аналізуючи отримане значення рухливості  $\mu_{gd}$  та значення дірково-фононного розсіювання можна зробити висновок, що вкладом „чистих” дислокацій в загальну рухливість при щільності дислокацій порядку  $N_a \sim 10^{12} \text{ м}^{-2}$  можна знехтувати. Це добре узгоджується з літературними даними, що „чисті” дислокації середніх щільностей не впливають на характеристики досліджуваної структури [4].

Вплив „чистих” дислокацій з крайовою межею проявляється при густинах дислокацій порядку  $10^{14} \text{ м}^{-2}$ , що на практиці рідко спостерігається. При такій густині дислокацій може відбутися інверсія провідності кремнію. Методом ВІМС було встановлено, що густина легуючої домішки (фосфору) змінюється по пластині в 3,5 рази (рис. 2), що, в свою чергу, вплине на положення рівня Фермі і

параметри готових приладів. Крім цього, така поведінка легуючої домішки призводить до зміни параметрів дислокацій з крайовою межею. Так, наприклад, при зміні концентрації легуючої домішки в 3,5 рази, радіус просторового заряду дислокації змінюється в 1,8 рази, що, в свою чергу, призведе до такої ж зміни рухливості  $\mu_{gd}$ .

На рисунку 3 а, б зображена типова картина дефектів шарової неоднорідності, яка отримана при травленні поверхні вихідної кремнієвої пластини селективним травником Сіртля на протязі 5 хвилин з попередньою обробкою в перекисноаміачному розчині. Спостерігаються концентричні кола які відповідають областям зменшеної енергії зв’язку атомів кремнію, що звичайно пояснюють накопиченням в цих областях сполук вуглецю [4] чи киснево-вакансійними комплексами. Присутність надлишкової концентрації кисню в області накопичення дефектів шарової неоднорідності підтверджуються результатами рентгенівського аналізу („Cam-Scan”) (таблиця) та результатами розрахунків спектрів ЕОС (рис. 4). Відмічено, що при нагріванні пластин кремнію до температури  $100^\circ\text{C}$  на протязі декількох днів дефекти шарової неоднорідності зникали, що пов’язано з процесами випаровування киснево-вакансійних комплексів та підтвержує киснево-вакансійну природу дефектів. На місці зниклих дефектів виявлені структурні дефекти та виділення іншої фази (рис. 5). Встановлено, що дефекти шарової неоднорідності при подальшій термообробці можуть служити центрами виникнення дефектів пакування (рис. 6). Ці дефекти в кремнії завжди мають міжвузлову природу та є частинами залишкової атомної площі, яка обмежена частковими крайовими дислокаціями, а їх електрична активність визначається параметрами дислокацій, які їх обмежують [4]. Дослідження показали, що основним видом дефектів які виникають під час окиснення пластин кремнію є дислокаційні сітки, які залягають на деякій відстані від поверхні. Ці сітки складаються, в основному, з повних крайових  $60^\circ$  дислокацій та часткових дислокацій (рис. 7). Густина дислокацій згідно з аналізом, проведеним на „Cam-Scan”, в зразках легованого бором кремнію становила  $10^{10} \text{ м}^{-2}$ . Методом ЕОС встановлено, що вздовж ліній дислокацій і в місцях перетину ліній дислокацій накопичуються домішки, в основному кисень. Кисень накопичується в областях максимальної зміни деформаційного потенціалу, біля ядер дислокацій, та складає добре відомі атмосфери Коттрела [5]. В залежності від положення атомів кисню в кристалічній ґратці він проявляє електричну активність чи є електрично пасивним. Так, атом кисню, який займає міжвузлове положення, не проявляє електричної активності. Кисень стає електрично активним, коли його атом заміщує атом кремнію у вузлі кристалічної ґратки чи, взаємодіючи з найближчою вакансією, створює комплекси „кисень у вузлі-вакансія” згідно з реакціями



де  $O_m$  – міжвузловий кисень,  $O_{Si}$  – атом кисню у вузлі

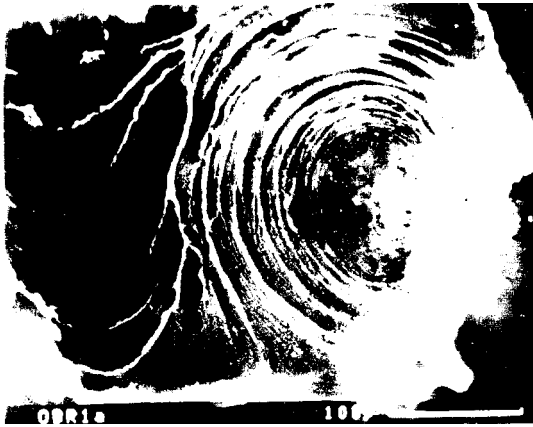


Рис. 3а. Загальна картина дефектів шаруваті неоднорідності по поверхні монокристалічного кремнію, яка отримана обробкою травником Сіртля протягом 5 хвилин (Cam-Scan).

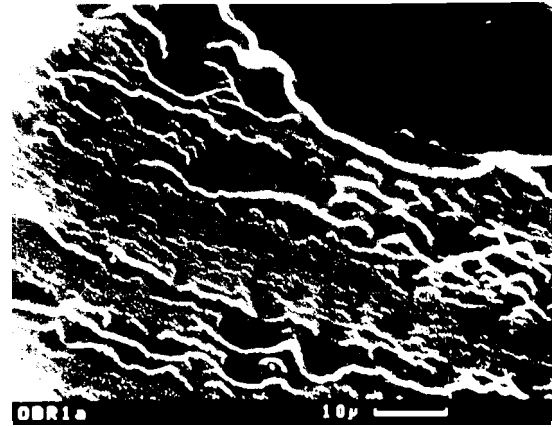


Рис. 3б. Збільшена картина дефектів шаруваті неоднорідності.

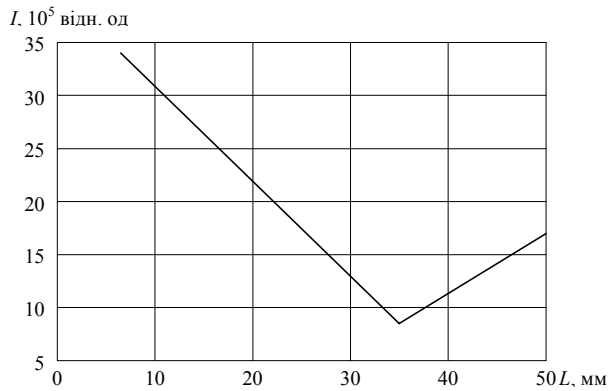


Рис. 4. Розподілення домішки бору на поверхні кремнієвої пластини. (ВІМС, відношення іонного струму бору до іонного струму кремнію).

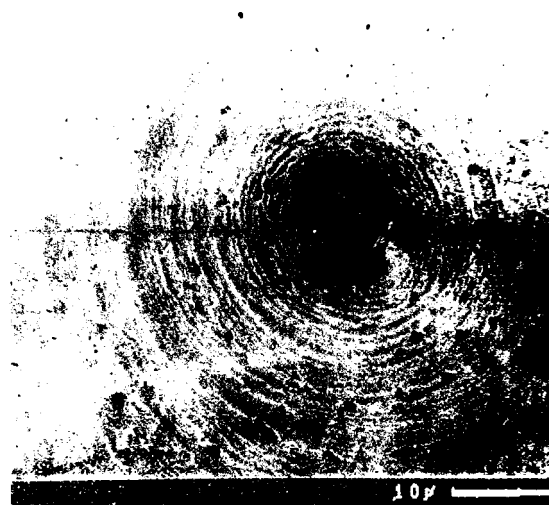


Рис. 5. Дефекти шаруваті неоднорідності, які отримані після прогріву при  $T = 100^{\circ}C$  (Cam-Scan).

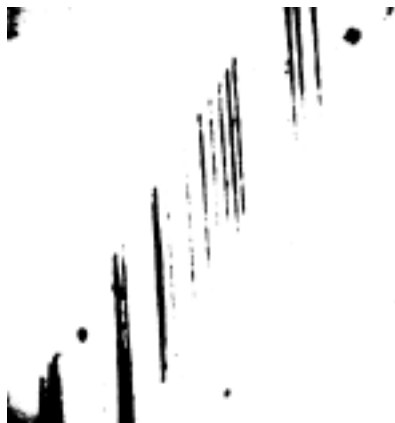


Рис. 6. Загальна картина дефектів пакування після зняття оксиду з поверхні р-кремнію.



Рис. 7. Типова картина дислокаційних сіток, отримана після легування бором.

гратки,  $V_{Si}$  – вакансія кремнію,  $V_1$  – вакансія, розміщена поряд з вузловим киснем. Перша реакція переводить міжвузловий кисень у вузловий, а друга реакція показує, як цей вузловий атом кисню з'єднується з найближчою сусідньою вакансією з віддачею одного валентного електрона. При цьому, в р-кремнії кисень проявляє донорні властивості та

створює додаткові активаторні енергетичні рівні. Крім того, накопичуючись в області ядер дислокацій, електрично активний кисень впливає на параметри крайових дислокацій. При цьому, виникає зміна радіуса просторового заряду крайових дислокацій, що, в свою чергу, призводить до зміни  $\langle \tau_g \rangle$ ,  $\mu_{gd}$  і  $\mu$ . Крім кисню в зразках кремнію Оже-аналізом була

виявлена присутність вуглецю (рис. 5). Сам вуглець в кремнії не створює додаткових акцепторних або донорних рівнів [4]. Електричну активність проявляють сполуки вуглецю з кремнієм типу  $Si_xC_y$  і  $Si_xC_yO_z$ . Таких з'єднань виявити не вдалось.

Оскільки активація електричної активності кисню відбувається при температурах від  $1100^\circ\text{C}$  до  $1300^\circ\text{C}$ , що відповідає температурному інтервалу окиснення кремнію, то можна допустити, що кисень, який створює атмосфери Коттрела в районі дислокацій, знаходиться в електрично активному стані.

Залишається відкритим питання про вплив межі розподілу оксид-кремній на загальну рухливість носіїв зарядів. Вважається, що вплив межі розподілу оксид-кремній на загальну рухливість носіїв заряду у каналі МОН транзисторів через наявність напруги електричного поля затвора дуже малий, якщо порівнювати його з впливом ефектів розсіювання носіїв від межі розподілу оксид-кремній [6].

Аналізуючи розв'язок рівняння Больцмана з граничними умовами Фука [8] (вважаємо, що носії зарядів рухаються паралельно межі розподілу оксид-кремній і має місце повне дифузне відбиття носіїв від цієї межі), отримуємо, що рухливість  $\mu_{gs}$  співпадає зі значенням рухливості при розсіюванні на "чистих" дислокаціях при щільності останніх порядку  $\sim 10^{12} \text{ м}^{-2}$ . Відмітимо, що така щільність дислокацій не має суттєвого впливу на результуючу рухливість. Вплив "чистих" дислокацій на  $\mu$  виявляється при щільності порядку  $\sim 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , що на практиці не спостерігається. При такій щільності дислокацій може наступити інверсія провідності кремнію.

Таким чином, на результуючу  $\mu$  впливають дислокації з преципітованими домішками, які знаходяться в електрично активному стані.

Неоднорідність легування кремнію буде впливати на положення рівня Фермі і відповідно на порогову напругу, зміна якої може бути утотожена

зі зміною напруги на затворі  $V_G$ , а також зі зміною  $I_D$ . Наявність же дефектів дислокаційного типу з преципітованими електрично активними домішками призводить до зміни висот потенціальних бар'єрів метал-оксид, оксид-кремній, зарядового стану межі розподілу і, через це, до зміни напруги плоских зон, яка, в свою чергу, викличе зміну положення рівня Фермі. Така зміна значень напруги плоских зон структур оксид-кремній, при наявності дислокаційних сіток, показала відхилення значень порогової напруги від теоретично розрахованих на 2,5-3 В. Такі відхилення не можуть бути отримані тільки при наявності неоднорідності легуючої домішки. При зміні  $N_{a,d}$  в 3,5 рази  $\Phi_F$  змінюється тільки в 1,2 рази.

Таким чином, на порогову напругу впливає не стільки зміна концентрації легуючої домішки, а наявність дефектів дислокаційного типу з атмосферами Коттрела, які визначають концентрацію носіїв зарядів та зарядовий стан межі розподілу оксид-кремній. Наявність "чистих" дислокацій та неоднорідність легувальної домішки несуттєво впливають на рухливість носіїв зарядів і порогову напругу і, таким чином, практично не впливають на результуючий струмопереніс, а відповідно і на магніто чутливість.

**Глауберман М.А.** – кандидат фізико-математичних наук, ст. н. с., зам. директора ННВЦ при ОНУ;  
**Кулініч О.А.** – кандидат фізико-математичних наук, ст. н. с. ННВЦ;  
**Сгоров В.В.** – кандидат технічних наук, зав. відділом ННВЦ;  
**Канищева Н.О.** – кандидат фізико-математичних наук, ст. н. с. ОНУ;  
**Козел В.В.** – кандидат фізико-математичних наук, ст. н. с. ННВЦ.

- [1] J.R. Brews. A charge-sheet model of MOSFET // *Solid-State Electronics*, **21**(2), pp. 345-355 (1978).
- [2] F. Van de Wiele. A long-channel MOSFET model // *Solid-State Electronics*, **22**(12), pp. 991-997 (1979).
- [3] О.А. Кулініч, А.А. Лісовська, Н.Н. Садова. // *УФЖ*, **35**(11), с. 1691 (1990)
- [4] К. Рейви. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии*. Мир, М. 471 с. (1984).
- [5] П.И. Баранский, В.П. Клочков, М.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника. Справочник*. Наукова думка, Киев, 704 с. (1975).
- [6] А. Коттрел. *Дислокации и пластическое течение в кристаллах*. Металлургиздат, М. 267 с. (1958).
- [7] P. Wang. Device Characteristics of short-channel and Narrow-width MOSFET's // *IEEE Trans. on Electr. Dev.*, ED-25(7), pp. 779-786 (1978).
- [8] В.Б. Фука. *Ионная проводимость в металлах и полупроводниках*. Наука, М. 296 с. (1969).

M.A. Glauberman, O.A. Kulinich, V.V. Yegorov, N.A. Kanischeva, V.V. Kozel

## **An Influence of Structure Defects of Presurface Silicon on Transduction Properties of Inversion-Injection Magnetosensitive Structure**

*Training, Scientific-Investigation and Production Centre, association with the Odessa's Mechnikov National University  
4, M. Govorova Str., Odesa, 65063, Ukraine*

The influence of structural imperfections, the impurity composition and the doping in homogeneity on the parameters responsible for sensitivity of the inversion-injection magnetosensitive structure has been found out with the aid of modern research methods.

The plates of initial monocrystalline and epitaxial silicon and oxidised silicon structures have been investigated.

Oxygen and carbon have been found out to be the basic impurities in the initial and oxidised silicon. Besides, oxygen demonstrates electrical activity and influences on the parameters of the structural defects, on which the charge carrier mobility and the threshold voltage are dependent.