

1. Карцев Е.А. Состояние и тенденции развития датчиков физических величин // Измерительная техника. 1991. № 12. С. 8-10. 2. Steve Sockolow, James Wong. High-accuracy analog needs more than op amps // ED. 1992. № 20. P. 53-61. Соколов С., Уонг Д. Особенности проектирования прецизионных аналоговых схем // Электроника. 1993. № 5-6. С. 53-59. 3. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. З. Готри, Р. Голяки. Львів: Вид-во ДУ "Львівська політехніка", 1999. 364 с.

УДК 621.382.323

В.В. Невзоров, Л.М. Смеркло

Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

ЗМЕНШЕННЯ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОТУЖНИХ ДМОН-ТРАНЗИСТОРІВ

© Невзоров В.В., Смеркло Л.М., 2001

Показано вплив дефектів та дислокацій на електричні параметри потужних ДМОН-транзисторів. Досліджено гетерування дефектів за допомогою іонної імплантації вольфраму. Запропоновано засоби зменшення дефектоутворення при проведенні технологічних операцій.

The influence of imperfections and dislocation on the electrical parameters of power DMOS transistors is presented in this paper. The imperfection gettering by W ions implantation is investigated. Methods for reduction of imperfection at technological process are proposed.

Вступ

Впливу дефектів кремнію на електричні параметри напівпровідникових приладів приділяється багато уваги. Це пов'язано з тим, що дефекти впливають не тільки на електричні характеристики приладів, але і на економічну ефективність виробництва, що становить крім технологічної, ще і економічну проблему.

Відомо, що на електричні характеристики біполярних приладів (пробивна напруга, зворотні струми витоку та інше) в основному впливають дефекти кремнію. МОН-прилади менш чутливі до об'ємних дефектів, але на їх параметри переважно впливають поверхневі дефекти та зарядовий стан окислу.

В останні роки підсилено розвивається новий клас напівпровідникових приладів – потужні ДМОН-транзистори, які поєднують в собі характеристики біполярних та МОН-структур. Вони більш чутливі до дефектів та процесів дефектоутворення, тому зменшення дефектності при виготовленні ДМОН-транзисторів є актуальним завданням.

У статті зроблено спробу проаналізувати типовий техпроцес виготовлення ДМОН-транзисторів та запропонувати шляхи зменшення дефектності.

Вплив технологічних операцій на процес утворення дефектів

При виготовленні ДМОН-транзистора дефекти будуть у першу чергу зменшувати пробивну напругу внаслідок утворення стоково-витокових трубок та збільшувати зворотні струми витоку. Крім дефектів, які вже закладені у вихідних пластинах, на параметри впли-

ватимуть дефекти, які утворюються під час проведення технологічних процесів. Це в першу чергу:

- окислювальні дефекти пакування, які утворюються при проведенні операцій окислення;
- дефекти невідповідності, які утворюються при дифузії за рахунок різниці між атомними радіусами кремнію та дифундуючої домішки;
- точкові та радіаційні дефекти, які виникають в процесі іонної імплантації;
- термомеханічні дефекти, які виникають при проведенні термічних процесів;
- вбудовані заряди в окислі кремнію, які утворюються під впливом іонізуючого випромінювання при плазмохімічних та напилювальних процесах.

Деякі з цих дефектів продемонстровані на рис. 1. Мікрофотографія зроблена автором при аналізі браку біполярної схеми серії K157. Декопірування дефектів проводилося на косому шліфі латерального р-n-p транзистора методом електрохімічного осадження заліза.

Методи боротьби з цими дефектами широко висвітлені в літературі, але вони належать або до біполярної, або до КМОН-технології і не враховують особливості виготовлення ДМОН-структур. Тому були проведені додаткові дослідження модифікації технологічних режимів з врахуванням особливостей виготовлення ДМОН-структур. В результаті цих досліджень було оптимізовано деякі технологічні процеси, а саме:

- впроваджено парофазне окислення при температурі 950 °С;
- зменшено швидкість охолодження пластин при термообробках до 3...10 °С;

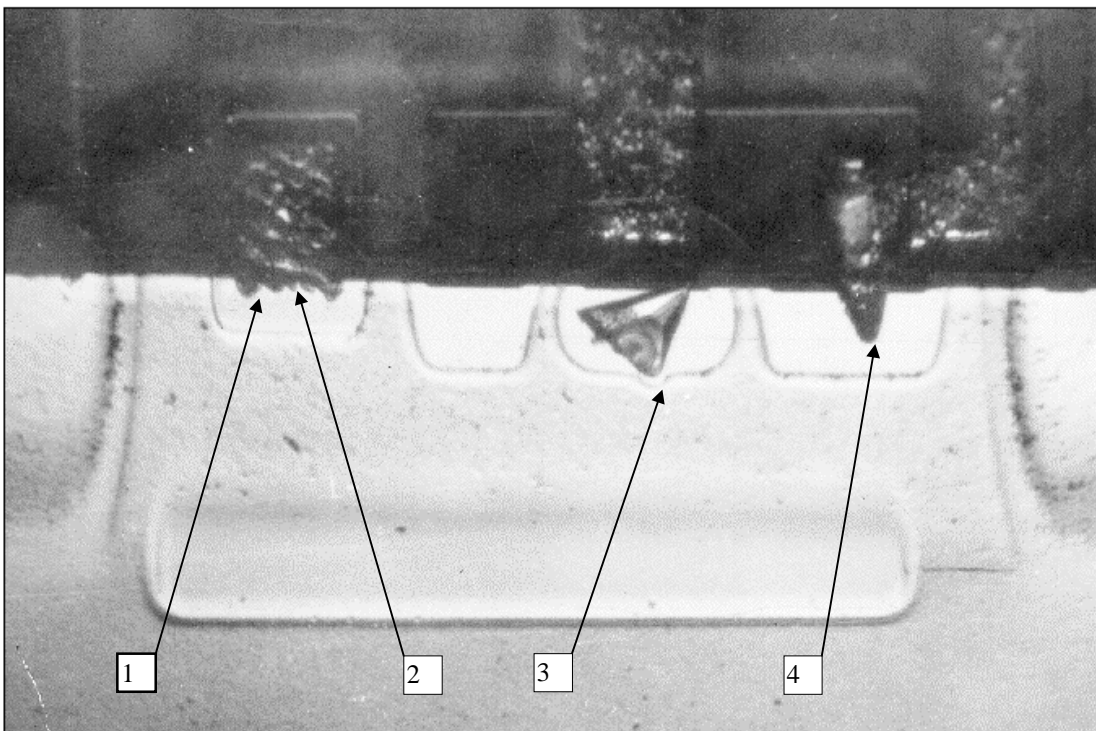


Рис 1. Мікрофотографія впливу дефектів на структуру біполярного транзистора:
 1 – аномальна глибина вплавлення AL металізації в місцях механічного напруження, яке виникає внаслідок різних КТР між Si та SiO₂; 2 – збільшена глибина вплавлення через дефекти невідповідності атомних радіусів P (0,11 нм) та Si (0,117 нм);
 3 – прискорена дифузія В в місці виникнення окислювального дефекту пакування;
 4 – проплав металізації в місці виникнення дефекту

- впроваджено іонну імплантацію As (атомний радіус 1,18 нм) замість P (атомний радіус 0,11 нм) для формування витокових областей;
- впроваджено формування каналу методом іонної імплантації As через шар підзатворного окислу;
- впроваджено двостадійний відпал іонно-імплантованих шарів при температурах 600 °C та 850 °C ;
- впроваджено двошарову металізацію Mo-Al для високовольтних транзисторів з напругою 1000 В;
- впроваджено відпал після плазмохімічних процесів при $T = 600...800$ °C.
- застосовано згладжування сходинки міжшарової ізоляції .

Всі ці заходи дозволили підвищити відсоток виходу придатних кристалів з 5 % за типовою технологією до 22 % за оптимізованою. Крім того, окремо було досліджено гетерування дефектів та шкідливих домішок іонами вольфраму.

Гетерування дефектів методом іонної імплантації вольфраму

Відомо багато способів гетерування дефектів та шкідливих домішок. Найбільшого розповсюдження отримав метод гетерування впорядкуванням кристалічної ґратки іонно-імплантованими атомами Ag, P, Ni тощо. Але вони мають декілька недоліків, один з яких полягає в тому, що в результаті термічних обробок гетеруючі властивості зникають, і тому потрібно проводити іонну імплантацію декілька разів протягом технологічного маршруту.

Гетеруючі властивості вольфраму досліджувалися методом іонної імплантації у неробочий бік вихідної пластини з подальшим проходженням пластин технологічним циклом, який передбачає також формування епітаксійного шару. Іонна імплантація вольфраму проводилася на установці “Везувій 8” з газоподібного джерела WF_6 з енергією імплантації 150 кеВ. Доза імплантації досліджувалась на тестових структурах в межах від $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{20}$ $см^{-2}$. Імплантація проводилась перед нарощуванням епітаксійного шару, після чого формувався тестовий р-п перехід і визначалась оптимальна доза D_{opt} . Потім при оптимальній дозі перевірялася ефективність гетерування на виготовлених транзисторах за робочими напругами та зворотними струмами витоку.

У результаті досліджень було встановлено, що гетеруючі властивості вольфраму ефективно проявляються при дозі імплантації, більшій за $5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ і що оптимальною є доза $D_{opt} = 1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$. Причому гетеруючі властивості вольфраму не послаблюються протягом подальших термообробок. Імплантація вольфраму може проводитись у будь-якому місці технологічного циклу перед термічною обробкою, але найбільша ефективність досягається, коли вона зроблена на початку технологічного маршруту виготовлення. Залежність зворотних струмів стокового переходу від дози імплантації наведена на рис. 2. З рис. 2 видно, що після дози $5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ зворотні струми зменшуються до 10...100 нА, що на 4...5 порядків менше, ніж на тестових структурах без іонної імплантації, тобто після дози $5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ ефективність гетерування досягає свого максимуму.

На рис. 3 та рис. 4 показані результати порівняння ДМОН-транзисторів, імплантованих вольфрамом з транзисторами, виготовленими за стандартною технологією.

Транзистори мали розмір кристала 5,5 x 5,5 мм з кількістю елементарних комірок 5760 шт., розрахунковою напругою пробою $U_{np} = 1000$ В, $R_c < 2,0$ Ом, $I_{c max} = 6$ А.

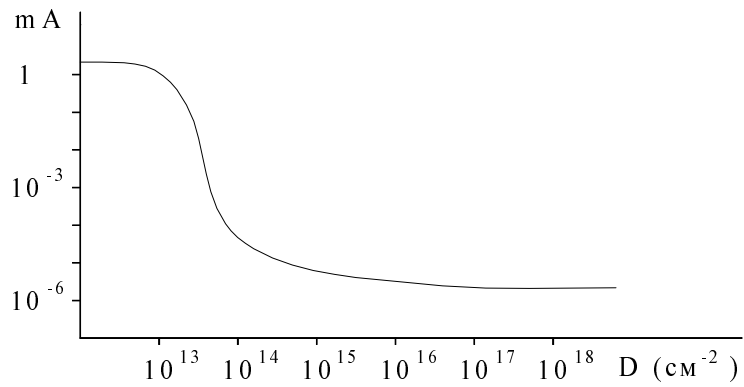


Рис. 2. Залежність зворотних струмів тестового P-N переходу від дози імплантації вольфраму

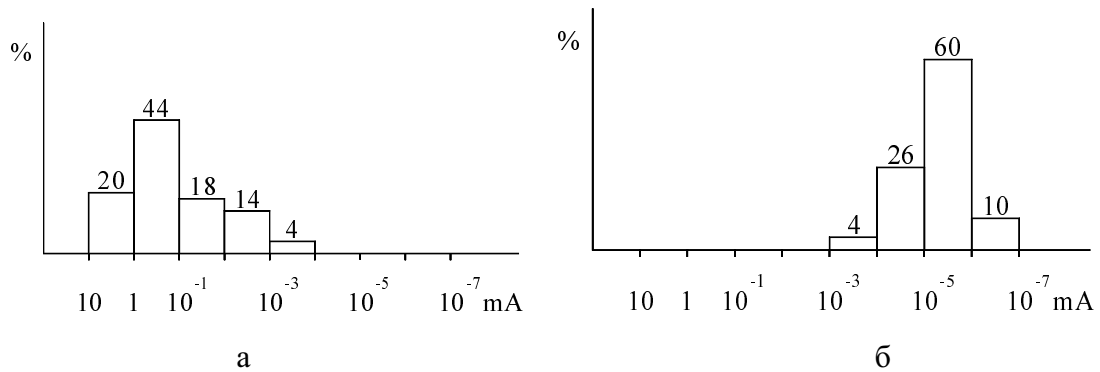


Рис. 3. Гістограма розподілу зворотних струмів витоку ДМОН-транзисторів:
 а – транзистори, виготовлені без іонної імплантації;
 б – дослідні транзистори з іонною імплантацією вольфраму

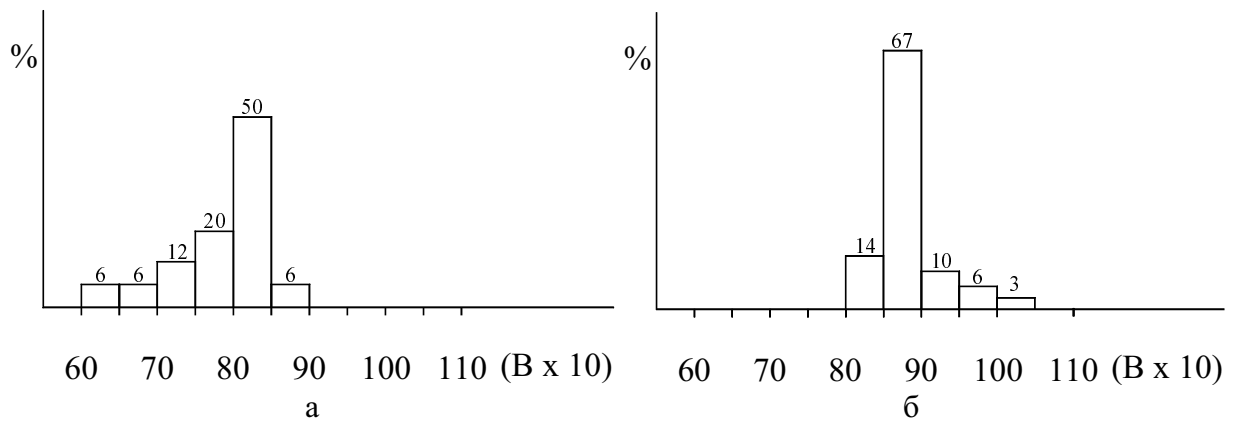


Рис. 4. Гістограма розподілу пробивних напруг витоку ДМОН-транзисторів:
 а – транзистори, виготовленні без іонної імплантації;
 б – дослідні транзистори з іонною імплантацією вольфраму

Гетерування іонами вольфраму разом з оптимізованими техпроцесами, які були описані вище, дозволило збільшити відсоток придатних до 63 % замість 5 % за типовою технологією.

Механізм гетерування методом іонної імплантації вольфраму

Оскільки іон вольфраму є тяжким, його гетеруючі властивості можна пояснити генерацією міжвузлових атомів та вакансій, які є ефективними центрами стоку для дефектів та шкідливих домішок. Крім того, велика різниця в атомних радіусах повина приводити до появи дефектів невідповідності і розірваних зв'язків кристалічної ґратки, які теж є ефективними центрами стоку.

Визначити механізм гетерування іонами вольфраму можна після оцінки ступеня порушеності кристалічної ґратки та можливості появи у кристалічній ґратці дефектів невідповідності та розірваних зв'язків. Характеристики атомів вольфраму та кремнію, які необхідні для розрахунків, наведені в таблиці.

| | Порядковий номер | Атомна маса | Атомний радіус |
|----------|------------------|-------------|----------------|
| Кремній | 14 | 28 | 0,117 нм |
| Вольфрам | 74 | 184 | 0,139 нм |

При гальмуванні іона W за рахунок ядерних зіткнень з атомами Si повного пробігу R можна знайти за формулою [1]:

$$R = \int_0^R dZ = \frac{1}{N} \cdot \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}, \quad (1)$$

де R – середня величина повного пробігу іону; N – кількість атомів мішені (для Si $N = 5 \cdot 10^{22}$ ат/см²); $S_n(E)$ – гальмівна спроможність ядер; $S_e(E)$ – гальмівна спроможність електронів.

Втрати енергії, які обумовлені пружною взаємодією, можна обчислити, використовуючи просту зворотну квадратичну апроксимацію [2]:

$$\frac{dE}{dZ} = 0,278 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})} \cdot \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cdot N. \quad (2)$$

У результаті перетворень виразу (1) отримуємо вираз, який придатний до практичного використання:

$$R = 0,07 \cdot \frac{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}{Z_1 \cdot Z_2} \cdot \frac{M_1 + M_2}{M_1} \cdot E_0 \text{ (нм)}. \quad (3)$$

Розрахунки показують, що при імплантації W критична енергія $E_c = 760$ кеВ, затрати енергії на зіткнення з ядрами $dE / dZ = 2,6$ кеВ/нм., а повний пробіг іонів $R = 56$ нм. $N_{вак} \cong 5,6 \cdot 10^{21}$ ат/см³, тобто поверхня після імплантації стає аморфною. Концентрація вольфраму $N_w = 1,8 \cdot 10^{22}$ см⁻³.

При подальших термічних обробках аморфний шар буде рекристалізовуватися, що призведе до дефектів невідповідності через невідповідність атомних радіусів W та Si . При цьому в ґратці кремнію будуть утворюватись механічні напруження, які можна вирахувати за формулою [3, 4]

$$\sigma = \beta \cdot \mu \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \left(N - \int_0^a N \cdot dy \right), \quad (4)$$

де μ – модуль зсуву; β – коефіцієнт стискання (виявляється як змінення в % періоду ґратки на 1 % домішки); ν – коефіцієнт Пуассона; N – концентрація домішки.

Концентрація впроваджених атомів, при якій напруження перевищать межу плинності кремнію, задається виразом [4]:

$$N(y_0) = \frac{1}{a} \int_0^a N dy. \quad (5)$$

Радіус просторового заряду, який утворюється в результаті появи вакансії, описується виразом [5]:

$$R_0 = \left[\frac{f_c}{\pi \cdot \alpha (N_d - N_a)} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

де f_c – функція розподілу Фермі; ($f_c = 0,1$ при 300°C); a – віддаль між обірваними зв'язками (для Si $a = 0,334$ нм); N_d та N_a – концентрація донорів та акцепторів.

Розрахунки показують, що при $N_w = 1,8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ механічні напруження в ґратці $\sigma = 4,5 \text{ дін/см}^2$, що перевищує межу плинності кремнію при температурі $T \cong 800^\circ\text{C}$ [6], повинні утворюватись розірвані зв'язки (не менше двох на іон вольфраму), які центрами для стоку дефектів та шкідливих домішок.

Тобто можна вважати, що гетерування дійсно проходить за механізмами, які були припущені вище. Для більш детального проведення кількісного аналізу необхідно подальше дослідження механізму гетерування із застосуванням рентгеноструктурних, електронооптичних та інших методів досліджень.

Висновки

Запропоновані методи зменшення дефектоутворення дозволяють значно збільшити економічну ефективність виробництва ДМОН-транзисторів за рахунок підвищення відсотка виходу придатних (22 % за оптимізованою технологією, 63 % із застосуванням гетерування W замість 5 % за типовою технологією).

Гетерування методом іонної імплантації вольфраму є ефективним засобом зменшення дефектоутворення і може застосовуватись при виробництві інших приладів та при розробці бездефектної технології виготовлення.

Для більш детального проведення кількісного аналізу необхідно подальше дослідження механізму гетерування з застосуванням рентгеноструктурних, електронооптичних та інших методів досліджень.

1. Schwarz S.A., Helts C.R. // *A Statistical Model of Sputtering, J. Appl. Phys.*, 50, № 8, 5492 (August 1979).
2. Gibson J.F. // *Ion Implantation in Semiconductions, Part 1, Range Distribution Teory and Experiments, Proc. IEEE* 56 № 3, 295-319 (1968).
3. Prussisn S. // *J. Ahhl. Phys.*, 32, 1876 (1971).
4. Czaja W. // *J. Appl. Phys.*, 37, 3444 (1966).
5. Matare H.P., Laakso C.W. // *J. Appl. Phys.*, 40, 476(1969).
6. Patel J.R., Chaudhuri A.R. // *J. Appl. Phys.*, 33, 2223 (1962).