

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАРИКАПА ЗІ ЗВОРОТНИМ ГРАДІЄНТОМ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШКИ В БАЗІ

Литвиненко В. М. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9425-5551

Розробка варикапів зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі дала змогу значно розширити частотний діапазон їх використання в якості змінної ємності, керованої напругою. Натомість широке впровадження варикапів стримується низьким виходом придатних варикапів, із-за значного розкиду значень їх номінальної ємності по площі пластини та високим рівнем зворотного струму варикапів. В статті розглянуті причини і механізми деградації зворотних характеристик варикапа та причини розкиду значень їх номінальної ємності по площі пластини. Показано, що причиною низького виходу варикапів на контролі їх зворотного струму являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів і сторонніх домішок. Встановлено, що головною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних варикапів є окислювальні дефекти упакування, що утворюються в активних областях варикапних структур в процесі проведення термічного окислення та інших високотемпературних операцій. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксіальних шарах кремнію є створення гетеруючої області на зворотному боці пластин за допомогою дифузії фосфору. Встановлено, що основною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних варикапів на контролі їх номінальної ємності є нерівномірність зворотного градієнта концентрації фосфору по площі пластини. Дослідження показали, що найбільш

ефективним методом підвищення рівномірності зворотного градієнта концентрації фосфору по площі пластини являється проведення іонного легування фосфором через хімічно вирощений окисел кремнію та додатковий відпал пластин за температури 560°C перед розгонкою фосфору. Наведено експериментальні результати дослідження впливу на електричні параметри варикапу гетерування та оптимізованої технології створення зворотного градієнта концентрації фосфору в його базі. Показана ефективність запропонованої технології виготовлення варикапу щодо підвищення відсотка виходу придатних приладів.

Ключові слова: варикап, окислювальні дефекти упакування, гетерування, зворотний градієнт концентрації, фосфор, зворотний струм.

Lytvynenko V. M. Optimization of the manufacturing technology of a silicon varicap with a reverse impurity concentration gradient in the base

The development of varicaps with a reverse gradient of impurity concentration in the base has made it possible to significantly expand the frequency range of their use as a voltage-controlled variable capacitance. However, the widespread introduction of varicaps is constrained by the low yield of suitable varicaps, due to the significant spread of their nominal capacitance values over the plate area and the high level of reverse current of varicaps. The article considers the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of the varicap and the reasons for the spread of their nominal capacitance values over the plate area. It is shown that the reason for the low yield of varicaps in controlling their reverse current is the significant influence of structural defects and foreign impurities on their reverse characteristics. It is established that the main reason for the low percentage of yield of suitable studied varicaps are oxidative packaging defects that form in the active areas of varicap structures during thermal oxidation and other high-temperature operations. The conducted studies have shown that the most effective method of preventing the formation of structural defects in epitaxial silicon balls is the creation of a gettering region on the reverse side of the plates

by means of phosphorus diffusion. It has been established that the main reason for the low percentage of yield of the tested varicaps for the control of their nominal capacitance is the unevenness of the reverse gradient of phosphorus concentration over the plate area. The studies have shown that the most effective method of increasing the uniformity of the reverse gradient of phosphorus concentration over the plate area is ion doping with phosphorus through chemically grown silicon oxide and additional plate precipitate at a temperature of 560°C before phosphorus distillation. Experimental results of the study of the influence of gettering on the electrical parameters of the varicap and the optimized technology for creating a reverse gradient of phosphorus concentration in its base are presented. The effectiveness of the proposed varicap manufacturing technology in increasing the percentage of yield of suitable devices is shown.

Key words: *varicap, oxidation packing defects, gettering, reverse concentration gradient, phosphorus, reverse current.*

Постановка проблеми. Варикапи широко використовуються в радіоелектроніці як змінна ємність, величина якої керується напругою [1]. Основними параметрами варикапів є його добротність, номінальна ємність, зворотний струм та коефіцієнт перекриття за ємністю, який визначає частотний діапазон використання варикапу. Розробка варикапів зі зворотним градієнтом концентрації (ЗГК) домішки в базі дала можливість істотно збільшити коефіцієнт перекриття за ємністю. З іншого боку, виникла проблема низького виходу придатних варикапів зі ЗГК домішки в базі за рахунок розкиду значень номінальної ємності приладових структур за площею пластини, а також високого рівня їх зворотних струмів. Як показав аналіз технологічного процесу виготовлення варикапа, основною причиною розкиду значень ємності є нерівномірність фронту розподілу ЗГК домішки в базі по площі пластини. Однією з причин є те, що іони фосфору при іонному легуванні потрапляють на пластину з різними швидкостями, які визначають глибину їх проникнення в об'єм кремнієвої пластини. Інша причина пов'язана з тим, що практично всі атоми фосфору після процесу іонного легування

знаходяться в міжвузлях і тому електрично не активні, що є однією з причин нерівномірної дифузії атомів фосфору в процесі їхньої подальшої розгонки. Як наслідок, нерівномірність фронту ЗГК домішки призводить до значного розкиду значень ємності варикапних структур по площі пластин.

Причиною низького виходу варикапів на операціях контролю їх зворотного струму являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів та сторонніх домішок [2, 3]. Домішки можуть потрапити на пластини напівпровідника, наприклад, з травильних розчинів, кварцевих труб дифузійних і окислювальних печей тощо. При наявності структурних дефектів в активних областях варикапних структур, домішки тяжких металів, прискорюючись вздовж дефектів, проникають в область просторового заряду р-п переходу, де створюють в забороненій зоні кремнію глибокі рівні, через які відбувається додаткова генерація носіїв заряду, що призводить до збільшення рівня зворотних струмів варикапа.

Генераційна компонента зворотного струму діода виражається формулою:

$$I_G = qSd \left(\frac{n_i}{\tau_n + \tau_p} \right), \quad (1)$$

де q - заряд електрона; τ_n, τ_p - час життя відповідно електронів і дірок в збудженій області р-п переходу; n_i - концентрація власних носіїв заряду в напівпровіднику; S - площа р-п переходу; d — ширина області просторового заряду р-п переходу.

Особливо інтенсивно проходить генерація носіїв заряду в області просторового заряду р-п переходу при наявності високої щільності структурних дефектів в активних областях діода, так як при цьому суттєво зменшуються τ_n, τ_p .

Для зменшення щільності або повної ліквідації структурних дефектів в кремнії використовуються різні методи гетерування [4, 5], але, як показала

практика, багато з них виявляються малоефективними для зниження рівня зворотного струму варикапів.

Формулювання мети дослідження. Метою даної роботи є розробка технології, що дозволяє значно підвищити рівномірність значень номінальної ємності варикапів по площі пластини і можливості застосування гетерування для поліпшення зворотних характеристик варикапа та підвищення виходу придатних приладів.

Експериментальні зразки. Структури досліджуваних варикапів виготовлялися за стандартною планарно-епітаксіальною технологією [6] на кремнієвих епітаксіальних структурах n-типу провідності з питомим опором 20 Ом·см і товщиною 10 мкм, вирощених на кремнієвій підкладці, орієнтованій за площиною (111). Для виготовлення варикапних структур проводилися такі основні технологічні операції: термічне окислення кремнієвих пластин за температури 1050°C в парах води протягом 100 хв з наступним відпалом пластин в середовищі аргону протягом 30 хв за температури процесу окислення; I фотолітографія для розкриття вікон у двоокисі кремнію; іонне легування фосфором при дозі легування 35 мкКл/см² та розгонка фосфору за температури 950°C протягом 55 хв для створення зворотного градієнта концентрації; II фотолітографія для розтину вікон під дифузію бору; загонка бору за температури T=980°C протягом 25 хв в атмосфері аргону і кисню для формування p-n переходу; III фотолітографія для розкриття вікон у плівці боросилікатного скла; формування омичного контакту на робочій стороні пластин шляхом осадження плівки алюмінію у вакуумі, проведення IV фотолітографії по шару алюмінію та подальший відпал пластин в інертному середовищі за температури T=500°C; шліфування зворотної сторони пластин та формування омичного контакту на зворотній стороні пластин послідовним нанесенням шарів титану та нікелю методом вакуумного термічного випаровування та золота методом гальванічного осадження.

Експеримент 1. Підвищення виходу придатних варикапів за рахунок використання гетерування. Для з'ясування причин деградації зворотних характеристик варикапів було проведено металографічні дослідження епітаксіальних структур після операції термічного окислення. Виявлення структурних дефектів проводилося за допомогою селективного травлення епітаксіальних структур в реактиві Сіртла. Час травлення : від 10 до 180 с. Після термічного окислення кремнію в епітаксіальних структурах були виявлені окислювальні дефекти упакування (ОДУ) щільністю $10^3 \dots 10^4$ см⁻². Мікрофотографія поверхні однієї з досліджуваних епітаксіальних структур після селективного травлення в реактиві Сіртла протягом 25 секунд наведена на рис. 1.

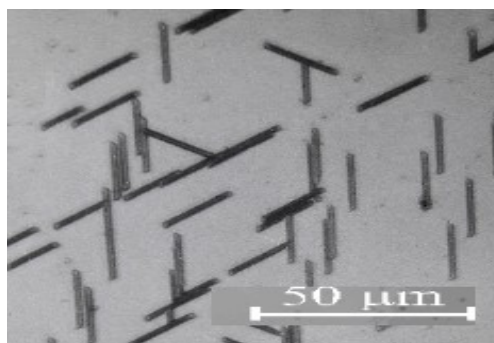


Рис.1. Поверхня епітаксіальної структури з виявленими ОДУ

Для протидії ОДУ необхідно було вибрати ефективний метод гетерування, який би органічно вписувався в технологічний маршрут виготовлення варикапа. Так як ОДУ утворюються при проведенні технологічної операції «Термічне окислення», то очевидно, що слід використовувати гетерування вже на самому початку технологічного маршруту виготовлення варикапа [5, 7]. Було випробувано кілька методів гетерування. Отримані експериментальні результати показали, що для пригнічення ОДУ найбільш ефективним є метод створення

області гетера на зворотному боці пластини за допомогою дифузії фосфору перед проведенням термічного окислення [8].

Область гетера була сформована на зворотній стороні пластини за допомогою дифузії фосфору з твердого джерела P_2O_5 за температури $1120^\circ C$ на протязі 80хв в атмосфері аргону (100 л/г) та кисню (5л/г).

Експеримент 2. Підвищення рівномірності значень номінальної ємності варикапів по площі пластини. Додатково перед операцією іонного легування проводилося хімічне окислення пластин у концентрованій азотній кислоті за температури $98^\circ C$ протягом 95 хв, при цьому товщина окисної плівки в робочому вікні дорівнювала 85 ангстрем. Далі проводилося іонне легування варикапних структур фосфором [1] з дозою легування 35 мкКл/см^2 і напрузі, що прискорює 50кВ. Перед операцією "Розгонка фосфору" ($T_p = 950^\circ C$) додатково проводився відпал пластин за температури $560^\circ C$ на протязі 30хв.

Дослідження ефективності розробленої технології. Для випробування запропонованої технології виготовлення структур варикапа зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі були сформовані дослідні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена за базовою технологією, друга частина – за розробленою технологією. Ефективність використання запропонованої технології оцінювалася:

- 1) за відсотком виходу придатних варикапних структур на контролі зворотного струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,5 \text{ мкА}$ за зворотної напруги 35 В;
- 2) за відсотом виходу придатних варикапних структур на контролі величини номінальної ємності (критерій придатності: номінальна ємність варикапних структур за зворотної напруги 1 В повинна знаходитися в межах 510...608пФ).

У таблиці 1 наведено порівняльні результати розбракування за зворотним струмом варикапів, виготовлених за базовою (партією №1, 2) та розробленою (партією №3, 4) технологіями.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики базової та розробленої технологій

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, %
Без використання гетерування	1	87
	2	83
З використанням дифузійного гетерування	3	94
	4	95

Видно, що використання розробленої технології виготовлення варикапів дозволяє підвищити вихід придатних варикапних структур за рівнем зворотного струму в середньому на 9,5%. При цьому варикапні структури, виготовлені із застосуванням розробленої технології, мали рівень зворотних струмів у 2...4 рази нижчий порівняно з варикапними структурами, виготовленими за базовою технологією.

Проведені перед формуванням омичного контакту з робочої сторони пластини металографічні дослідження на структурах варикапів, виготовлених із застосуванням гетерування, показали відсутність в них структурних дефектів.

На рис. 3 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією та за технологією з використанням гетерування. Видно, що варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування має ВАХ (крива 2) типову для кремнієвого діода при відсутності в його активних областях структурних дефектів та небажаних домішок. І, навпаки, варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має так звану

«м'яку» ВАХ (крива 1), вигляд якої може вказувати на наявність в активних областях варикапу структурних дефектів і домішок металів.

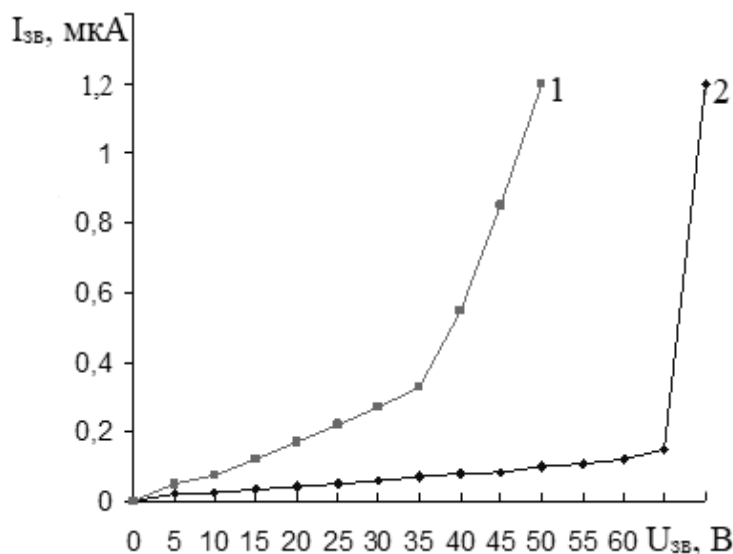


Рис. 3. Типові зворотні ВАХ варикапних структур: 1 – варикапна структура, виготовлена за базовою технологією; 2 - варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування

З порівняння кривих 1 і 2 видно, що варикапна структура, виготовлена за базовою технологією (крива 1), має набагато більший рівень зворотних струмів у порівнянні з варикапною структурою, виготовленою з використанням гетерування (крива 2).

Для оцінки розкиду значень номінальної ємності варикапа по площі пластини було зроблено обчислення коефіцієнта варіації:

$$k_B = \frac{1}{\bar{x}} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right\} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де x_i – i -те значення вимірюваної величини; \bar{x} – середнє значення вимірюваної величини; n – кількість вимірів.

Розрахунок коефіцієнта варіації за формулою (2) для базової технології склав $k_B = 4,62$, а для розробленої - $k_B = 3,15$, що говорить про значне підвищення рівномірності по площі пластини значень номінальної ємності

варикапних структур, виготовлених за розробленою технологією, у порівнянні з варикапними структурами, що виготовлені за базовою технологією.

У таблиці 2 наведено порівняльні результати розбракування за значенням номінальної ємності варикапів, виготовлених за базовою (партією №5, 6) та розробленою (партією №7, 8) технологіями.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики базової та розробленої технологій

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапних структур за значенням номінальної ємності, %
Розроблена технологія	5	44
	6	45
Базова технологія	7	35
	8	38

З таблиці 2 видно, що використання запропонованої технології виготовлення варикапів дозволяє підвищити вихід придатних варикапних структур в середньому на 8%, очевидно, за рахунок зменшення розкиду значень номінальної ємності варикапних структур по площі пластини (суттєве зменшення розкиду значень номінальної ємності варикапних структур по площі пластини підтверджено розрахованими значеннями коефіцієнта варіації для базової та розробленої технологій).

Проаналізуємо механізми впливу області гетера, створеної за допомогою дифузії фосфору на зворотній стороні пластини перед термічним окисненням на зворотний струм варикапа.

У процесі дифузії фосфору на зворотній стороні пластини формується висока щільність дислокацій, що є стоком для домішок металів, також пригнічуються зародки ОДУ, які можуть утворюватися в кремнії при вирощуванні злитків і в процесі епітаксії. Це значною мірою запобігає утворенню ОДУ в процесі термічного окиснення пластин. Якщо з будь-якої причини ОДУ в процесі термічного окиснення все-таки утворилися, то в

процесі проведення наступної високотемпературної операції - дифузії бору атоми кремнію, що становлять ОДУ, дифундують до стоків області гетера, створеним на зворотній стороні пластини, і захоплюються ними, що призводить до ліквідації ОДУ. Ефективне гетерування неконтрольованих домішок (зазвичай, домішок важких металів) та структурних дефектів, утвореним на зворотній стороні пластини гетеруючим шаром, забезпечує значне зниження рівня зворотних струмів варикапних структур та збільшення виходу придатних варикапів.

Проаналізуємо механізми впливу легування через шар окислу, вирощеного за рахунок хімічного окислення пластин в парах азотної кислоти, а також вплив додаткового низькотемпературного відпалу на параметри варикапа. Реалізацію поставленої мети можна представити наступним чином. Перед проведенням операції „Іонне легування” пластини окислюють хімічним способом (в розчині азотної кислоти) для одержання в робочих вікнах плівки SiO_2 , а перед розгонкою фосфору додатково проводиться низькотемпературний відпал пластин. Вирощений у робочому вікні оксид гасить і вирівнює кінетичну енергію іонів фосфору, які вилітають з великою швидкістю з джерела іонів, зменшуючи тим самим щільність радіаційних дефектів, які генеруються в кремнії в процесі іонного легування, що підвищує рівномірність дифузії атомів фосфору за площиною пластин в процесі проведення технологічної операції «Розгонка фосфору». Низькотемпературний відпал пластин, який проводиться перед проведенням технологічної операції «Розгонка фосфору», активізує атоми фосфору, які знаходяться після процесу іонного легування в міжвузлях, що також сприяє підвищенню рівномірності дифузії атомів фосфору за площиною пластин в процесі розгонки.

Висновки. Застосування розробленої технології виготовлення структур варикапів з використанням гетерування областю гетера, що створена на зворотній стороні кремнієвої пластини за допомогою дифузії фосфору, дозволяє очистити активні області діодів від зародків дефектів та небажаних

домішок і запобігти утворенню в них структурних дефектів, що забезпечує суттєве зниження рівня зворотних струмів діодів і підвищення виходу придатних приладів.

Проведення іонного легування варикапних структур фосфором через тонку плівку SiO_2 , отриману хімічним окисленням, та їх додатковий низькотемпературний відпал перед розгонкою фосфору в процесі формування зворотного градієнта концентрації фосфору в базі варикапу сприяють підвищенню рівномірності значень ємності варикапів за площиною пластини і, як слідство, дають можливість підвищити вихід придатних варикапних структур на контролі їх номінальної ємності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів. Херсон : ФОП Вишемирський В.С, 2018. 184 с.
2. Meda L., Gerofolini G.F., Queirodo Gr. Impurities and defects in silicon single crystal //Progress Crystal Growth and Characterization, 1987. Vol.15. №2. P. 97-131.
3. Ravi K.V. Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon. John Wiley & Sons, New York, 1981. 379 p.
4. Lecrosnier D., Paugam J., Richou F. et al. Influence of phosphorus-induced point defects on a gold-gettering mechanism in silicon // J. Appl. Phys., 1980. Vol. 51. №2. P. 1036-1040.
5. Renschi S. Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // Japanese Journal of Applied Physics, 1984. Vol. 23. №8. Pt.1. P. 959-964.
6. Павлов С. М. Основи мікроелектроніки. Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 224с.
7. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, 2020, iss. 1–2, p. 45 – 50.

8. Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N. et al. Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits. *Technology and design in electronic equipment*, 2013; no. 2-3, p . 43-57.

REFERENCES

1. Litvinenko V.M. (2018) *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovidnykovykh diodiv [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]*. Kherson. Vyshemirsky V.S., 184 p. [in Ukrainian]
2. Meda L., Gerofolini G.F., Queirodo Gr. (1987) Impurities and defects in silicon single crystal // *Progress Crystal Growth and Characterization*, 15(2), 97-131.
3. Ravi K.V. (1981) *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 379 p.
4. Lecrosnier D., Paugam J., Richou F. et al. (1980) Influence of phosphorus-induced point defects on a gold- gettering mechanism in silicon // *J. Appl. Phys*, 51(2), 1036-1040.
5. Renschi S. (1984) Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(8), 1, 959-964.
6. Pavlov S. M. (2010) *Fundamentals of microelectronics. Tutorial*. Vinnytsia: VNTU, 224p. [in Ukrainian]
7. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. (2020) Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, no. 1–2, p. 45 – 50. [in Ukrainian]
8. Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N. et al. (2013) Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits. *Technology and design in electronic equipment*, no. 2-3, p . 43-57.