



УДК 621.382

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАРИКАПІВ З ОМІЧНИМИ КОНТАКТАМИ НА ОСНОВІ NI ТА AL

Литвиненко Віктор Миколайович¹, Волос Олексій Олегович¹, Шутов Станіслав
Вікторович², Самойлов Микола Олександрович²

¹Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Е. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

Адреса для листування: Литвиненко Віктор Николаевич, к.т.н., доцент.

Місце роботи: Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

Email: hersonlvn@gmail.com

Анотація. Представлені результати дослідження причин деградації зворотних ВАХ варикапних структур при формуванні омичних контактів на основі алюмінію та нікелю. Наведені дані по оптимізації процесів формування алюмінієвого та нікелевого омичних контактів за рахунок використання операцій гетерування структурних дефектів. Приведені технологічні режими створення гетеруючих областей на варикапних структурах.

Ключові слова: омичний контакт, діодні структури, гетерування, варикап.

Вступ. Основна функція омичних контактів - це підведення електричного струму до областей напівпровідникових приладів. Омичні контакти повинні забезпечувати певні параметри приладів та бути механічно міцними. В процесі виготовлення контакти завжди піддаються тепловій обробці для поліпшення адгезії плівок, а також для зменшення опору системи метал – напівпровідник. При цьому, як показала практика, має місце суттєвий вплив процесів формування омичних контактів на електричні параметри напівпровідникових приладів, що призводить до зниження проценту виходу придатних приладів. Незважаючи на використання різних технологічних методів, направлених на запобігання впливу операцій формування омичних контактів на електричні параметри варикапів, в процесах формування деяких видів омичних контактів має місце деградація зворотних вольт-амперних характеристик (ВАХ) варикапів.

У зв'язку із цим є актуальним продовження досліджень причин деградації електричних параметрів в процесах формування омичних контактів та розробки методів її запобігання.

Матеріали та методи дослідження. Структури варикапів виготовлялися за стандартною епітаксійно - планарною технологією [1].

Досліджено фактори, які призводять до деградації зворотних характеристик варикапів з нікелевим і алюмінієвим омичними контактами, та запропоновані технологічні методи, які дозволяють значно покращити параметри варикапів.

Проблеми формування нікелевого омичного контакту у виробництві варикапів.

З'ясування причин аномально високих рівнів зворотних струмів у виробництві діодів з нікелевим омичним контактом було проведено на структурах варикапної матриці. Топологія такого варикапу наведена на рис. 1.

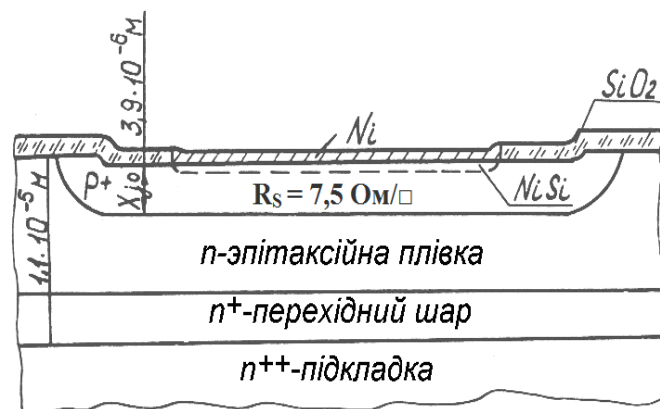


Рис. 1. Топологія досліджуваного p^+ - n варикапу

Як вихідний матеріал використали кремнієві епітаксійні структури з товщиною епітаксійного шару 11 мкм і питомим опором 1,7 Ом·см.

Технологічний процес виготовлення досліджуваного варикапу включає три високотемпературні операції: окислення при температурі 1150°C протягом 100 хвилин, першу стадію дифузії бору (загонку) із джерела нітриду бору (BN) при 1100°C протягом 20 хвилин, другу стадію дифузії бору (розгонку) при 1150°C в атмосфері вологого й сухого кисню на протязі 80 хвилин. Легована бором p^+ - область мала поверхневий опір $\sim 7,5$ Ом/□. Глибина залягання p^+ - n переходу була порядку $3,9 \cdot 10^{-4}$ см. Омичні контакти на діодних структурах одержували методом хімічного осадження нікелю з наступною термообробкою структур в атмосфері аргону при $T = 200 - 600^\circ\text{C}$.

Даний варикап має відносно велику площу $p^+ - n$ переходу ($\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$) і досить високий рівень зворотних струмів: більше 10^{-10} А . Це дозволяє швидко й точно виконувати виміри величини зворотного струму як на конкретних структурах, так і на партії структур. З іншої сторони використання діода великої площі дозволяє зменшити роль випадкових помилок і підвищити вірогідність результатів за рахунок збільшення обсягу вибірки.

Друга важлива особливість даного варикапу пов'язана з формуванням омичного контакту. Під час другої фотолітографії у двоокисі кремнію розкриваються вікна до p^+ - області під омичний контакт. Нікелеву плівку в межах розкритих вікон формують методом хімічного нікелювання. Нікель осаджується тільки в межах розкритих вікон. Після промивки нікельованих структур у деіонізованій воді виконують відпал діодних структур. Така технологія забезпечує відсутність нікелю на SiO_2 над ділянками виходу $p^+ - n$ переходу на поверхню. З іншого боку, відповідно до конструкції варикапу, край нікелевої плівки вилучений від ділянок виходу $p^+ - n$ переходу на поверхню на відстань 50 мкм. Ці два фактори, забезпечують незначну зміну поверхневої складової зворотного струму діодів при проведенні процесу відпалу структур.

На рис. 2 наведена зворотна гілка вольт-амперної характеристики (ВАХ) однієї й тієї ж варикапної структури до відпалу (крива 1), і після відпалу при 400°C протягом 2,5 хвилин (крива 2) і 6 хвилин (крива 3). Видно, що в процесі відпалу величина зворотного струму варикапних структур зростає на 2-3 порядки.

Для доказу того, що за таке істотне підвищення зворотного струму відповідальний нікель, що дифундує через p^+ - область до $p^+ - n$ переходу, був поставлений додатковий експеримент. На структури варикапів був осаджений нікель. Потім нікелеву плівку видалили кип'ятінням в азотній кислоті, структури відмили в дистильованій воді й провели їх відпал в середовищі аргону при 400°C на протязі 6 хвилин у термічній печі.

До і після відпалу на тих самих структурах контролювалася зворотна гілка ВАХ.

Після цього структури були декапировані протягом 15 секунд в 10% - ній плавиковій кислоті, відмиті в дистильованій воді, на них знову осадили нікель.

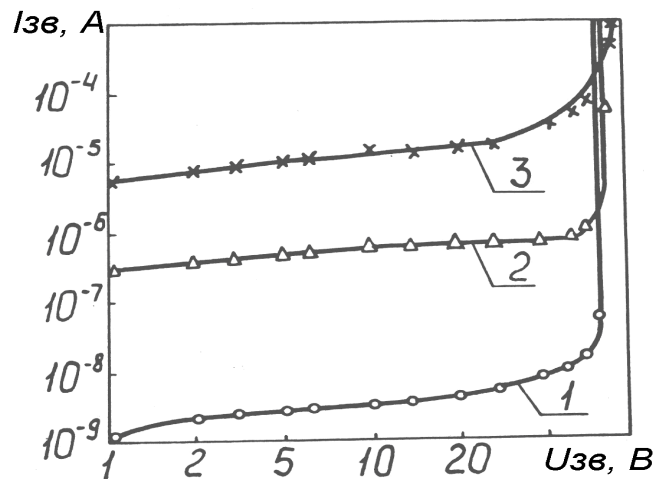


Рис.2. Зворотні ВАХ p^+ - n варикапних структур після різних тривалостей відпалу структур ($T_{\text{відп}} = 400^\circ\text{C}$): - $t_{\text{відп}}$, хв.: 1 – 0; 2 – 2,5; 3 – 6

Далі проводили відпал варикапних структур в середовищі аргону при 400°C на протязі 6 хвилин та контроль зворотного струму на тих же структурах. Важливим результатом даного експерименту є те, що після першого відпалу величина зворотного струму, практично, не змінилася, а після другого - величина зворотного струму зросла на 3,5 порядки. Даний експеримент підтверджує те, що за зростання зворотного струму варикапних структур відповідальний нікель.

Попередніми дослідженнями було встановлено, що якість варикапів з омичним контактом на основі нікелю знаходиться в прямій залежності від щільності ОДУ, які утворилися в активних областях приладів в процесах високотемпературних операцій, що проводяться в окислювальному середовищі.

Моделювання процесу забруднення окислювального середовища домішками тяжких металів завжди призводить до зростання щільності ОДУ і до різкого підвищення рівня зворотних струмів варикапних структур.

Проблеми формування алюмінієвого омичного контакту у виробництві варикапів.

Встановлено, що причиною частих відмов напівпровідникових приладів з алюмінієвою металізацією є прокол p - n переходів алюмінієм при термообробці після осадження плівки алюмінію [2]. Селективне видалення плівки алюмінію з поверхні підкладки в області контактної вікна після термообробки при 470°C протягом 30 хв. виявляє катастрофічне погіршення морфологічної досконалості міжфазної межі контакту у вигляді глибоких порожнин в кремнії. Експериментально встановлено, що виникнення проколів p - n переходів пов'язано із зазначеними

вакансійними порожнечами, що утворюються як результат неоднорідного розчинення кремнію в алюмінії (рис.3).

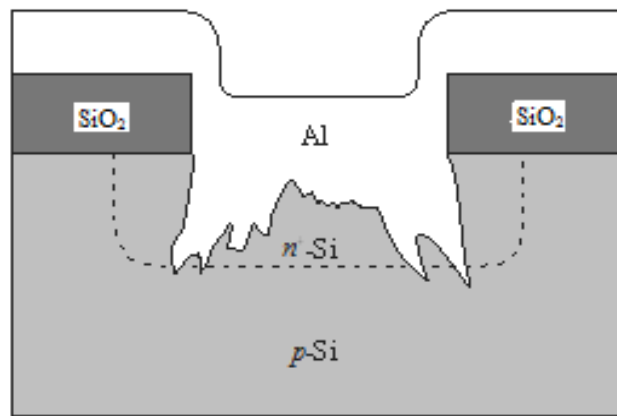


Рис.3. Схема розчинення кремнію алюмінієвою плівкою: неоднорідне розчинення кремнію плівкою алюмінію, утворення пустот в кремнії, заповнення алюмінієм пустот, в результаті чого відбувається прокол р-n переходу

Глибина проникнення вістря алюмінію вглиб кремнію, що оцінюється за глибиною пустот в локальних місцях області контакту, практично не змінюється в діапазоні 300-500°C і становить 40-90 нм. У діапазоні температур 500-577°C відбувається різке зростання глибини проникнення до 1,25-1,45 мкм. Поблизу гострих вершин включень алюмінію локально збільшується напруженість електричного поля.

Неоднорідне розчинення кремнію і заповнення пустот, що утворюються, алюмінієм, а також відзначене різке зростання глибини проникнення алюмінію вглиб кремнію в діапазоні 500-577°C викликані появою рідкої фази, яка «проплавляє» кремній, хоча температура термообробки нижча ніж, температура плавлення евтектики. На це вказує також той факт, що кількість розчиненого в алюмінії кремнію значно перевершує ту кількість, яка повинна розчинитися згідно діаграмі фазових рівноваг в алюмінії при вказаній температурі термообробки.

Результати дослідження. Для запобігання впливу процесів формування омичних контактів на зворотні характеристики варикапів з нікелевим та алюмінієвим омичними контактами були розроблені додаткові технологічні операції, в тому числі і операції гетерування дефектів та домішок.

Покращання зворотних характеристик кремнієвих варикапів з
нікелевим омичним контактом.

Як було показано вище, структурні дефекти в кремнії приводять до підвищення рівня зворотних струмів варикапів. Одним з основних видів структурних дефектів, що утворюються в

кремнії при проведенні високотемпературних термічних операцій, є ОДУ, що представляють собою прошарки, у яких порушене нормальне чергування щільно упакованих шарів [3]. Для зменшення впливу ОДУ на параметри р-п структур використовують різні методи гетерування [3-6]. У даній роботі досліджувався вплив процесів гетерування дефектів за допомогою дифузійного легування на зворотні струми кремнієвих варикапних структур з нікелевим омичним контактом.

Омичні контакти на діодних структурах одержували шляхом хімічного осадження нікелю з наступною термообробкою в інертному середовищі при температурі 400°C на протязі 10 хвилин. Термообробка (відпал плівки нікелю) потрібна для зменшення контактного опору системи Ni – Si і підвищення адгезії плівки нікелю до кремнію [2]. З метою гетерування структурно - домішкових дефектів в кремнії перед хімічним осадженням нікелю проводили додаткову дифузію бору в робочу сторону пластин при температурі $T = 1050^\circ\text{C}$ протягом 20 хвилин.

На рис. 4 представлені зворотні гілки ВАХ варикапних структур, виготовлених на частинах однієї пластини. З рисунка видно, що після термообробки зворотна гілка ВАХ варикапної структури, виготовленої з використанням додаткової дифузії бору, практично не змінилася, а у структури, виготовленої за базовою технологією, відбулося різке “пом'якшення” ВАХ.

Механізм впливу ОДУ на зворотні характеристики досліджуваних варикапних структур можна пояснити в такий спосіб. Наявність високої щільності ОДУ в кремнії ($10^3\text{-}10^5\text{ см}^{-2}$) приводить до істотного збільшення коефіцієнта дифузії нікелю уздовж дефектів і нагромадженню його в області просторового заряду p^+ - n переходу. При такій високій щільності дефектів зони їхніх пружних напружень перекриваються, тому що одиничні ОДУ оточені зоною механічних напруг діаметром близько 50 мкм [3].

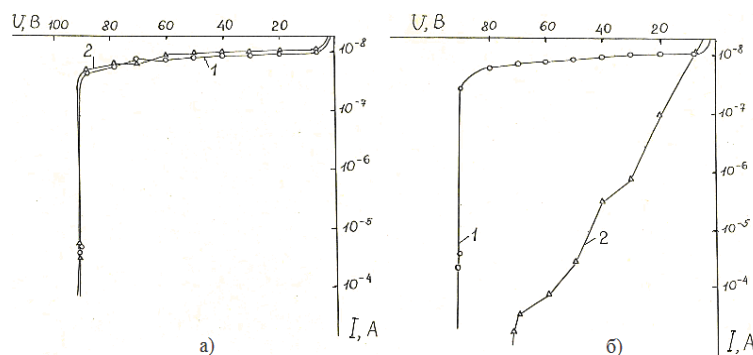
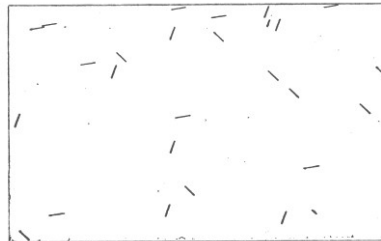
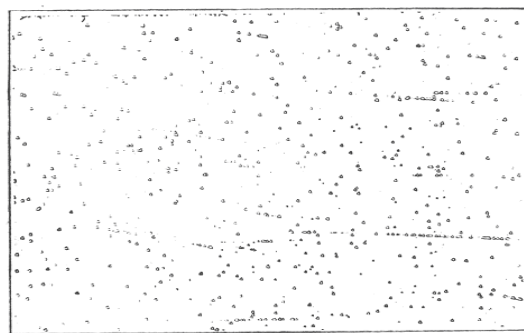


Рис. 4. Зворотні галузі ВАХ варикапних структур безпосередньо після осадження нікелю (1) і наступного відпалу структур (2): а - варикапні структури, виготовлені з використанням додаткової дифузії бору; б - варикапні структури, виготовлені за базовою технологією (без використанням додаткової дифузії бору)

Наявність механічних напруг приводить до збільшення граничної розчинності нікелю в кремнії в області об'ємного заряду p^+ -п переходу. У результаті цього, а також через зростання коефіцієнта дифузії нікелю в кремнії уздовж структурних дефектів, відбувається значне збільшення дифузійного потоку атомів нікелю в область p^+ -п переходу. Недекоровані атомами домішок ОДУ не роблять істотного впливу на зворотні струми варикапних структур, внаслідок їх слабкої електричної активності (криві 1 на рис. 4, а і б). Вплив нікелю на зворотні ВАХ діодів пояснюється тим, що нікель утворює у забороненій зоні кремнію два акцепторні рівні, через які відбувається додаткова генерація носіїв струму в області просторового заряду p^+ -п переходу [7]. Цим можна пояснити різке збільшення після термообробки рівня зворотних струмів варикапної структури, виготовленої без використання додаткової дифузії бору (рис. 4, а, крива 2). З метою об'єктивного обґрунтування механізму впливу гетеруючої дифузії бору на зворотну гілку ВАХ варикапних структур, останні виготовлялися на половинках пластин. При цьому на одній з половинок кожної пластини проводилася додаткова дифузія бору. Після цього на обох половинках пластини було проведено виявлення структурних дефектів за допомогою реактиву Сіртла.



а)



б)

Рис.5. Мікрофотографії поверхні структур варикапів після травлення в реактиві Сіртла (збільшення $287\times$):

а - структура варикапу, виготовленого за базовою технологією; б - структура варикапу, виготовленого з використанням додаткової дифузії бору при $T=1050^\circ\text{C}$

На рис. 5 наведені мікрофотографії поверхні досліджуваних варикапних структур після виявлення структурних дефектів в реактиві Сіртла. Видно, що на пластині з додатковою дифузією бору (рис. 5, б) ОДУ практично відсутні. Очевидно, що в процесі проведення додаткової дифузії бору відбувається гетерування ОДУ. Це можна представити таким чином. У процесі проведення додаткової дифузії бору на поверхні варикапних структур формується сильно легований бором гетеруючий шар. Міжвузольні атоми кремнію, які є складовими окислювальних дефектів упакування, дифундують до утвореної області гетера і захоплюються нею. У результаті цього окислювальні дефекти упакування зменшуються в розмірах, або повністю зникають (рис. 5, б). Цей вплив додаткової дифузії бору дозволяє запобігти деградації зворотної галузі ВАХ варикапних структур після їх відпалу (рис. 4, а, б).

Оптимізація технології формування алюмінієвих омічних контактів на структурах варикапів.

Експерименти були проведені в технологічному циклі виготовлення кремнієвого варикапу зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі [8].

В якості вихідного матеріалу використовувались кремнієві епітаксійні структури n- типу провідності, леговані фосфором завтовшки 8 мкм та питомим опором 20 Ом·см, сформовані на підкладці, легованої сурмою, яка має товщину 350 мкм та питомий опір 0,01 Ом·см. Після стандартної хімічної обробки проводили окислення кремнієвих епітаксійних структур при температурі 1050°C з наступним чергуванням циклів: відпал в середовищі аргону (15 хвилин) – окислення в парах води (100 хвилин) - відпал в середовищі аргону (30 хвилин). Товщина вирощеного захисного шару двооксиду кремнію склала 0,7 мкм.

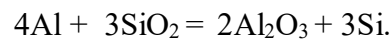
Було проведено опробування двох технологічних методів, направлених на попередження деградації зворотних характеристик варикапів, це додаткове легування півки алюмінію кремнієм, а також використання методу гетерування структурних дефектів гетером, який був сформований на зворотній стороні кремнієвої пластини перед технологічною операцією «Термічне окислення».

Для формування області гетера на робочу сторону пластин наносили фоторезист ФП383, видаляли півку двооксиду кремнію на зворотній стороні пластини травленням в плавиковій кислоті, проводили формування області гетера методом іонного легування зворотної сторони пластин фосфором при дозі $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ і енергії іонів 100 кеВ.

У процесі послідовних високотемпературних операцій відбувається ефективно гетерування домішок металів утвореним гетеруючим шаром, подавляються зародки дефектів упакування, які утворились при вирощуванні злитків, в процесі епітаксії, а також в процесі термічного окислення. Це в великій мірі запобігає утворенню дефектів упакування в кремнії при проведенні

високотемпературних технологічних процесів – розгонки фосфору, загонки бору. Утворений гетеруючий шар також дає можливість ліквідувати дефекти упакування, які утворились в процесі термічного окислення пластин. Ліквідація структурних дефектів зменшує вірогідність проникнення алюмінію в область р-n переходу, за рахунок прискореної дифузії алюмінію в кремній вздовж структурних дефектів. Ефективне гетерування утвореним гетеруючим шаром домішок металів та структурних дефектів забезпечує значне зниження рівня зворотних струмів варикапних структур та підвищення виходу придатних варикапів.

Додаткове легування плівки алюмінію кремнієм проводили таким чином. Наносили порошок кварцового скла на центрифuzі на плівку алюмінію та проводили відпал кремнієвих пластин для одержання омичного контакту кремнію з алюмінієм при $T=500^{\circ}\text{C}$ в середовищі аргону; при цьому в процесі відпалу алюміній взаємодіє з двоокисом кремнію і відтворює двоокис кремнію до чистого кремнію за реакцією:



При цьому утворені атоми кремнію дифундують в плівку алюмінію. Збільшення концентрації кремнію в алюмінії за рахунок вище приведеної реакції зменшує вірогідність дифузії кремнію в плівку алюмінію із об'єму епітаксійної плівки та зустрічної дифузії алюмінію в епітаксійну плівку кремнію, що запобігає утворенню локальних заглиблень алюмінію в кремній у вигляді голки, які призводять до короткого замикання р-n переходів.

На рис. 6 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією та за запропонованою технологією з використанням додаткових технологічних операцій: додаткового легування плівки алюмінію кремнієм та використання методу гетерування структурних дефектів гетером, сформованим на зворотній стороні кремнієвої пластини.

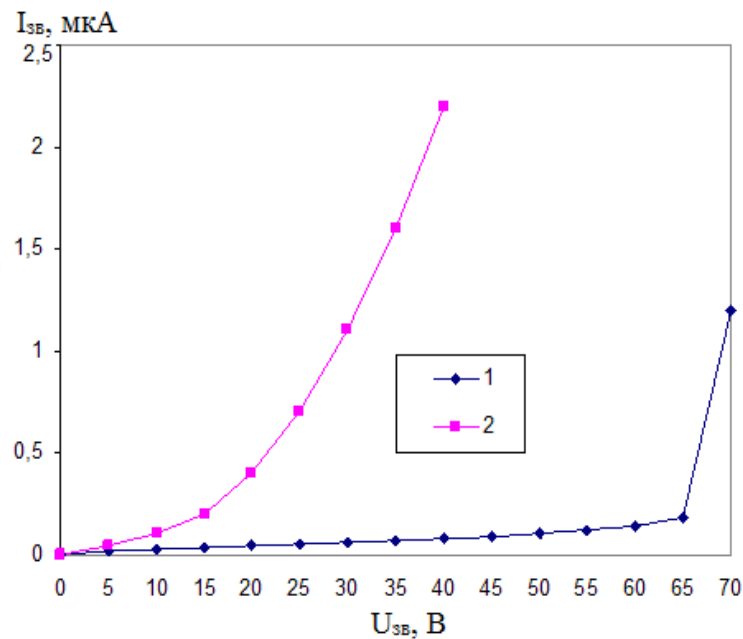


Рис.6. Зворотні ВАХ варикапних структур: 1 – варикапна структура, виготовлена за запропонованою технологією; 2 - варикапна структура, виготовлена за базовою технологією

Як видно з рис. 6, варикапна структура, виготовлена за запропонованою технологією має ВАХ (крива 1) 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 2), вигляд якої вказує на наявність в активних областях варикапу структурних дефектів (окислювальних дефектів упакування, дислокацій) та домішок металів або при наявності глибоко проникаючого в область об'ємного заряду p^+ - n переходу вістря алюмінію.

З порівняння кривих 1 і 2 видно, що варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має набагато більший рівень зворотних струмів у порівнянні з варикапною структурою, виготовленою за запропонованою технологією

Обговорення результатів. Таким чином, основною причиною деградації зворотних ВАХ варикапів з нікелевим омичним контактом являються ОДУ в активних областях варикапів. Показано, що проведення додаткової дифузії бору перед хімічним осадженням нікелю дозволяє ліквідувати ОДУ в активних областях варикапів, що дає можливість суттєво зменшити рівень їх зворотних струмів.

Причиною частих відмов напівпровідникових приладів з алюмінієвою металізацією є глибоке проникнення вістря алюмінію в область об'ємного заряду p^+ - n переходу при термообробці

після осадження плівки алюмінію. Показано, що попереднє додаткове легування плівки алюмінію кремнієм та створення області гетера на зворотній стороні кремнієвих пластин іонним легуванням фосфором дозволяє запобігти глибокому проникненню Al в Si і, тим самим, виключає деградацію зворотних ВАХ варикапів.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Курносоев А.И., Юдин В.В. Технология изготовления ПП и ИМС. - М.: Радио и связь, 1986. - 368 с.
2. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поуга, К. Ту, Дж. Мейера и др. - М.: Мир, 1982. - 576 с.
3. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. - М.: Мир, 1984.- 472 с.
4. Литвиненко В.Н. Улучшение обратных характеристик кремниевых диодов с омическим контактом на основе никеля //Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1986. - Вып. 6. – С.58 – 62.
5. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники / В.А. Лабуноев, И.Л. Бараноев, В.П. Бондаренко, А.М., Дорофеев. – Зарубежная электронная техника, № 11(270), 1983. –М.: ЦНИИ “Электроника”. - С. 3-66.
6. Литвиненко В.Н., Богач Н.В. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования // Вестник ХНТУ №1(60), г. Херсон, 2017. – С. 32-42.
7. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. - М: Мир, 1977. – 562 с.
8. Акулюшин Л.А., Круглов А.И., Шульц С.М. Варикап со сверхрезкой зависимостью емкости от напряжения, предназначенный для частотных генераторов. – Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1984, Вып. 4(170), С. 48-53.