

УДК 621.315.592

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОМІГРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Кравчина В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікроелектронних інформаційних систем, Запорозька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна.

Полухін О. С. – провідний інженер ТОВ «Елемент-Перетворювач», Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проведені дослідження дозволяють удосконалити технологічні процеси виготовлення н/п приладів та контроль їх якості.

Мета роботи – розробка і вдосконалення технології СНП з використанням процесів ТМ Al та дослідження рельєфу травлення кремнію в області p^+ -Si ізоляції. Досліджувався вплив часу відпалу на особливості МТ канавок в області термоміграції.

Метод. Об'єктом дослідження були технологічні особливості процесів формування структур за різними маршрутами, що відрізняються послідовністю проведення процесів формування активних структур, а саме процесів відпалу структур і термоміграції Al.

Результати. В роботі проаналізовані причини зміни напруги пробою p - n -переходів вертикальних наскрізних областей, створених термоміграцією, в залежності від часу відпалу н/п структур. На зразках з оптимальним режимом відпалу в 16 годин при температурі 1250 °С спостерігаються максимальні напруги пробою шарів ізоляції та мінімальні величини МПТ канавок травлення кремнію різного типу провідності в області ізоляції кристалів наскрізними ТМ шарами. Такий мінімальний мікрорельєф визначає мінімум залишкових механічних напружень. Показано, що при виготовленні н/п структур приладів більшої потужності із зворотною напругою 2000 В, оптимальним є варіант маршруту, коли спочатку проводять процеси загонки домішок глибоких активних шарів, а потім проводять процеси ТМ при формуванні шарів ізоляції. Надалі проводять суміщений відпал як ізоляції, так і активних шарів. Таке суміщення процесів відпалу покращує характеристики структур.

Висновки. В роботі визначено оптимальний маршрут, режим відпалу структур та показано, що контроль змін кінетики травлення шарів кремнію в області ТМ домішки алюмінію допомагає у визначенні оптимальних режимів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: відпал, ізоляція, мікрорельєф канавок, лінійні зони, ТМ, силові напівпровідникові пристрої.

АБРЕВІАТУРА

н/п – напівпровідник;

ВО – відокремлювальна область ізоляції;

СНП – силові напівпровідникові прилади;

ТМ – термоміграція Al, термоміграційний;

ФМе – фотолітографія по металу;

ВВЗ – високотемпературне вибіркове змочування

Si у вікнах SiO₂ розплавом Al;

ФК – фотолітографія «контакти» (формування вікон в SiO₂ під ТМ);

МПТ – мікрорельєф поверхні травлення в області ТМ.

НОМЕНКЛАТУРА

U_R – напруга пробою шару ізоляції;

dT/dx – градієнт температури;

p^+ -Si – шар ТМ кремнію, легованого Al;

C – концентрація атомів кремнію;

Al-Si – розплав лінійної зони;

n -Si – вихідний кремній n - типу провідності;

C_1^* , C_2^* – концентрація Si відповідно на холодній та гарячій стороні розплаву зони Al-Si;

T_1 – температура холодної сторони розплаву зони Al-Si;

T_2 – температура гарячої сторони розплаву зони Al-Si;

t_{BO} – час другого етапу відпалу структур;

t_{1f} – час першого етапу відпалу структур;

D_{Al} – коефіцієнт дифузії алюмінію;

C_1 , C_2 – рівноважна концентрація Si відповідно на холодній та гарячій поверхні розплаву зони Al-Si;

C_{BO} – концентрація домішки Al в ТМ каналі;

[100] – кристалографічна орієнтація пластин Si;

C_{nSi} – концентрація домішки фосфору у вихідній пластині Si;

CP – стандартний розчин для травлення Si;

ρ_{sT} – поверхневий опір пластин після проведення ТМ;

ρ_s – поверхневий опір вихідних пластин;

h_{n-Si} – глибина канавки травлення n -Si;

$\Delta h_{Si\sigma}$ – висота горбка Si(σ) з механічними напруженнями відносно рівня h_{n-Si} ;

Δh_{p-Si} – глибина канавок у місцях заглиблень p^+ -Si відносно рівня h_{n-Si} ;

$L_{Si\sigma}$ – ширина одного горбка Si(σ) каналу p^+ -Si;

L – ширина між зовнішніми краями виступів Si(σ) одного ТМ каналу p^+ -Si;

l_m – ширина вікон в масці SiO₂ після фотолітографії ФК, стартова ширина зони ТМ;

l_{mT} – ширина зони ТМ на рівні h_{n-Si} ;

Δl_{p-n} – величина бокового травлення заглиблення p^+ -Si;

L_{kt} – ширина заглиблення p^+ -Si на рівні h_{n-Si} ;

I_R – зворотний струм просочування;

H_{Si} – товщина вихідної пластини n -Si;

H_{n-Si} – товщина пластини після травлення в області n -Si;

$H_{Si\sigma}$ – товщина пластини в області горбків Si(σ);

H_{p-Si} – товщина пластини в місці заглиблень p^+ -Si;

U_{Rmax} – максимальна напруга пробою для вибірки приладів одного часу відпалу;

V – швидкість руху фази розплаву зони Al-Si;

d_{Al} – величина латеральної дифузії алюмінію при відпалі ВО;

Si(σ) – шар Si з механічними напруженнями за межами каналу ТМ.

ВСТУП

Сучасні СНП на струм до 200–250 А і зворотну напругу до 3 кВ виготовлюються, як правило, в модульному варіанті конструкції з пластмасовим корпусом, де чипи силових елементів (діодів, тиристорів, симисторів, фототиристорів та ін.) змонтовані на ізолюваній теплопровідній підкладці з металізованої кераміки. Кристали, зазвичай прямокутної або квадратної форми, формуються та випробуються за груповою технологією на пластинах кремнію. Перед монтажем на металізовану підкладку пластини розділяються на чипи. Ізоляція легованих активних шарів окремих кристалів формується завдяки створенню по периферії кристалів локальних наскрізних дифузійних ВО.

Об'єктом дослідження є технологія формування ізоляції за допомогою локальних ВО. ВО на пластинках створюють різними методами: двобічною дифузією, термоміграцією та ін. Найбільш перспективними є розроблені та вдосконалені технології на основі процесів ТМ. Предмет дослідження становлять структури н/п приладів, які сформовані із застосуванням процесів ТМ.

Метою роботи є розробка і вдосконалення технології СНП з використанням процесів ТМ Al і та дослідження процесів травлення кремнію ВО.

1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Групова технологія виготовлення СНП із застосуванням процесів ТМ алюмінію передбачає використання процесів травлення кремнію та формування меза-каналов на поверхні пластин в області p^+ -Si ізоляції, які відкривають вертикальні випрямні p - n -переходи ВО. В канавках осаджується та формується ізоляційна діелектрична плівка, яка в поєднанні з ізоляцією p - n -переходом ТМ p^+ -Si визначає властивості та електрофізичні характеристики ізоляції СНП. Н/п структури діоду, які виготовлені за такою технологією показані на рис. 1.

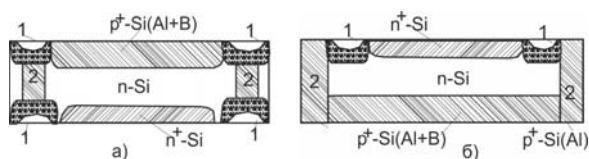


Рисунок 1 – Н/п структури діоду з ізоляцією ТМ та легковисновими стеклами: а) формування каналів 1 над ТМ каналом p^+ -Si(Al) - 2; б) - виведення контакту від p^+ -Si(Al+B) аноду на одну сторону з контактом до n^+ -Si катоду за допомогою каналу 2 випрямних p - n -переходів

Форма, глибина та рельєф каналов впливає на величину струму просочування I_R та напругу пробією U_R , тому важливе значення має дослідження особливостей процесів травлення шарів кремнію в області формування термоміграційних каналів. При формуванні якісної ізоляції н/п структур повинні виконуватися певні вимоги відносно електрофізичних властивостей вертикальних ВО, які не повинні поступатися

© Кравчина В. В., Полухін О. С., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-2

властивостям плоских активних переходів. Виконання таких вимог пов'язано з якісним відновленням порушень структури, які утворилися в процесі ТМ, а дослідження кінетики травлення канавок допомагають контролювати цей процес. Задачею роботи є оптимізація технології формування н/п структур СНП.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

ТМ або зонна перекристалізація градієнтом температури [1] – спосіб, пов'язаний з послідовною перекристалізацією н/п матеріалу рідинною зоною металу – розчинника, що рухається в полі градієнта температури, залишаючи позаду себе перекристалізований шар, легований атомами металу – розчинника з концентрацією, яка визначається рівноважною розчинністю при температурі процесу. Найбільш перспективним способом створення ВО є ТМ лінійних зон на основі алюмінію [1–6]. Оскільки процес проходить в умовах, які є близькими до рівноважних [1], і концентраційне переохолодження є надзвичайно малим, то створені в такий спосіб ВО відповідають вимогам досконалості електрофізичних властивостей та кристалографічної довершеності. Реалізація наскрізної ізоляції, шляхом тривалої двосторонньої дифузії бору або бору з алюмінієм, збільшує пробивну напругу високовольтних p - n -переходів, забезпечує ефективний тепловідвід, спрощує процес контролю кристалів на пластині і пайку їх на підставу, виключає деградацію зворотної гілки вольт-амперної характеристики через механічні напруження на паяному шві та ін. [6, 7]. Проте час формування наскрізних областей шляхом двобічної дифузії є неприпустимо великим (для бору – близько тижня, для бору з алюмінієм – близько 72 годин при температурі 1280 °С). Властивості структур кремнію під час такої довготривалої термічної обробки погіршуються. Використання термоміграції рідинного розплаву Si-Al в якості альтернативи двосторонньому дифузійному легуванню розділових p^+ -областей дозволяє в сотні разів зменшити час їх формування. Відповідно до зменшення часу високотемпературного процесу зменшується бокове легування ВО. Для формування якісної ізоляції з малими струмами просочування важливим є невисока концентрація фонових домішок. В процесі ТМ, за рахунок процесів кристалізації, відбувається зменшення концентрації фонових домішок, в тому числі і вихідної домішки пластини [2, 8].

Спрощено процес ТМ можна пояснити на прикладі поведінки рідинної фази розплаву Al-Si, що занурена в об'єм кремнію та має градієнт температури dT/dx (рис. 2а). Нижній край рідинної фази при цьому має температуру T_1 , а верхній відповідно T_2 ($T_2 > T_1$). Цим температурам згідно фазовій діаграмі відповідають рівноважні концентрації кремнію в розплаві C_1 і C_2 ($C_2 > C_1$) (рис. 2б). Оскільки концентрація кремнію більше на «гарячій» стороні рідинної фази, ніж на «холодній», то в рідинній фазі відбувається дифузійний переніс кремнію від «гарячої» сторони T_2 до «холодної» T_1 . За рахунок цих додаткових атомів концентра-

ція кремнію на «холодній» межі C_1^* перевищує рівноважну концентрацію C_1 , і внаслідок чого в таких шарах рідинної фази протікає процес кристалізації «зайвої» частини атомів кремнію.

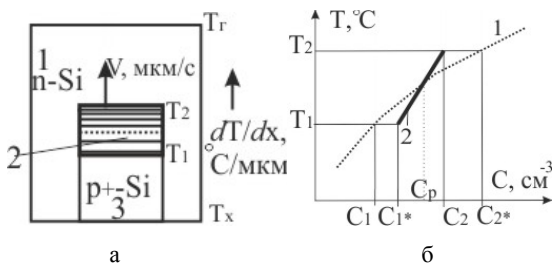


Рисунок 2 – Схема процесу ТМ:

а – рух лінійної зони Al-Si 2 в n-Si 1 з dT/dx з утворенням легованого шару p^+ -Si(Al) 3; б – фрагмент фазової діаграми зони Al-Si 2 поблизу лінії ліквідус 1 в області спадання концентрації кремнію C зі зниженням температури

Навпаки, виникаюча нестача атомів кремнію на гарячій межі, де $C_2^* < C_2$, стимулює розчинення в рідинній фазі атомів кристалу з більшою температурою для встановлення рівноважного стану згідно з фазовою діаграмою. Таким чином рідинна фаза рухається в полі градієнта температури (рис. 2), залишаючи позаду себе перекристалізований шар p^+ -Si, який леговано атомами Al. А концентрація Al визначається його розчинністю в Si при температурі процесу і складає $(1...2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При досліджуваних значеннях параметрів процесу рідинна фаза має товщину $20 \div 40 \mu\text{m}$, з перепадом температур на краях в $0,2-0,5^\circ\text{C}$, і рухається в об'ємі кристалу кремнію зі швидкістю $V=0,08-0,8 \mu\text{m/s}$.

Формування ВО із застосуванням процесів ТМ містить низку технологічних операцій. Спочатку на поверхні пластин Si створюють сітку лінійних зон відповідно до топології майбутніх чипів. Потім проводять міграцію лінійних зон Al-Si крізь пластину у полі температурного градієнта. Надалі виконується решта операцій технологічного маршруту виготовлення напівпровідникових структур.

Формування лінійних зон на пластинах з полірованим кремнієм в практиці ряду фірм втілюється за допомогою напилення суцільного шару алюмінію потрібної товщини з наступною ФМе. Якщо пластина має шліфовану поверхню, потрібно перед напиленням додатково проводити травлення та створювати канавки кремнію. Незважаючи на простоту, такий метод має суттєву ваду – наявність на межі «метал-напівпровідник» прошарку природного окислу та забруднень, що призводить до так званої стартової затримки зони при міграції, яка, в свою чергу, сприяє «фасетуванню» зон на старті процесу [8]. Тому стабільна міграція неорієнтованих зон, які сформовані напиленням, є можливою тільки для пластин кремнію з поверхнею (111).

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В роботі використовується варіант формування зон з примусовим ВВЗ розплавом Al-Si в області вікон. Для цього на пластині створюється плівка SiO_2 , яка забезпечує захист поверхні активних шарів Si від дії розплаву алюмінію на операції ВВЗ. Після ФК і формування вікон в плівці SiO_2 , пластини розміщують у спеціальному формувачі – слайдері автомата формування зон ОН 1878 (рис. 3а), де при заданій температурі поверхня кожної пластини послідовно приводиться в контакт з розплавом зонуотворюючого матеріалу Al-Si. Під час такого процесу на поверхні вікон формуються заглиблені в об'єм кремнію зони, які при ТМ починають рухатися в об'ємі без помітної стартової затримки (за рахунок відсутності процесу утворення бар'єрного прошарку). Процес ТМ проводиться в термічному вузлі установки ОН 1840, який показано на рис. 3б. Завдяки такій технології вдається запобігти протіканню процесів фасетування зон при їх зануренні і стає можливою стабільна міграція неорієнтованих лінійних зон, в тому числі і на пластинах Si з кристалографічною орієнтацією [100] і навіть [110] [9]. Селективність процесу осадження та впровадження домішки алюмінію на поверхні відкритого Si визначає його як самосумісний, що разом із підвищенням якості (із-за відсутності ФМе), сприяє оптимізації технології в цілому.

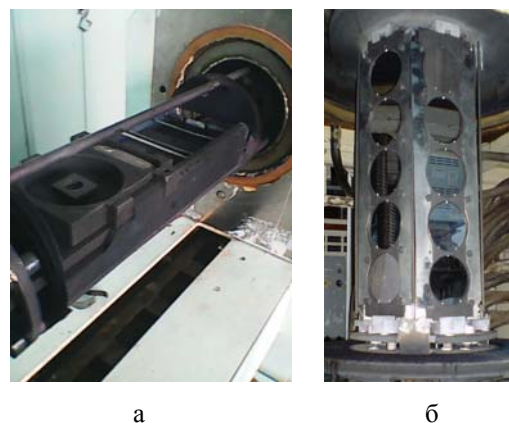


Рисунок 3 – Обладнання для ВВЗ та ТМ, відповідно:
 а – слайдер-формував лінійних зон Al-Si;
 б – термічний вузол установки ТМ

При порівнянні особливостей процесів ТМ спостерігаються деякі відмінності в застосованому апаратному оформленні. Якщо ряд підприємств зазвичай застосовує газонаповнені установки з одностороннім інфрачервоним відпалом системою кварцових галогенних ламп [3–5], то в базовій технології застосовуються установки з багатопозиційним резистивним відпалом [6, 7]. Процес за досліджуваною технологією проводиться у вакуумі $\sim 10^{-4} \text{ мм.рт.ст.}$, де алюміній, при досягненні в процесі ТМ фінішної сторони пластини, випаровується, і не виникає необхідності проведення подальших операцій з його вилучення з поверхні. Натомість, використання газонаповнених

установок, після ТМ додатково потребує технології вилучення міграційних залишків [9]. Збільшення товщини пластин на величину, яка видаляється після ТМ, є небажаним як через втрати вихідного кремнію, так і через проведення додаткової механічної обробки, що збільшує відсоток бракованих структур. Отримані результати досліджень разом з набутим виробничим досвідом дозволили розробити та впровадити технологічний маршрут виготовлення н/п структур СНП на розробленому технологічному обладнанні [6].

При розробці та впровадженні у виробництво технологічного маршруту формування структур СНП важливим є визначення оптимального режиму відпалу після ТМ в процесі формування ВО та його узгодження з процесами основного відпалу при формуванні активних шарів н/п структури СНП. Для цього визначається місце ТМ не в кінці часового інтервалу основного відпалу виготовлення н/п структури СНП, а на його початку або в середині. Якщо для створення порівняно невеликих чипів (1 А, 400 В, площа 1×1 мм²) виправданим є проведення ТМ після створення всіх плоских (випрямних і інжектуючих) *p-n*-переходів активних структур [5], то при виготовленні н/п структур приставів більшої потужності з більшою площею та зворотною напругою до 2000 В застосовується варіант маршруту, коли спочатку термоміграцією створюють ВО, а надалі активна структура формується в процесі дифузійних відпалів [3]. Під час дифузії відбувається також дифузійна розгонка вертикальних *p-n*-переходів ВО. Таке суміщення процесів відпалу покращує випрямні властивості ВО. Проте, якщо брати до уваги порівняно високий коефіцієнт дифузії алюмінію, $D_{Al} = 4 \times 10^{-11}$ см²/с при 1250 °С, тривала розгонка переходів ВО веде до втрати корисної площі активної структури. Тому використовується оптимізований варіант маршруту, при якому дифузія алюмінію і бору для створення глибоких плоских випрямних переходів проводиться в два етапи, а ТМ проводиться в проміжку між ними [11]. Визначаючи експериментально оптимальний час відпалу після ТМ t_{BO} , знаходимо значення t_{ij} часу відпалу активних шарів за виразом:

$$t_{ij} = T_B - t_{BO}. \quad (1)$$

Такий підхід дає низку технологічних переваг і використовується при створенні чипів СНП на напругу до 2000 В і струм до 200 А [6, 7]. При експериментальних дослідженнях н/п структури, розміром 20×20 мм, формувалися на шліфованих пластинах *n-Si* КЕФ-40 діаметром 100 мм та товщиною 350 мкм. ТМ Al проводилася на розробленому устаткуванні при температурі 1220 °С на протяжні 120 хв. Залежність пробивної напруги н/п структур від часу відпалу досліджувалась на зразках, де відпал проводився на протяжні 4, 9 та 16 годин при температурі 1250 °С. Глибина дифузії Al при відпалі ВО визначалася за формулою [12]:

$$d_{Al} = \sqrt{D_{Al} t_{BO}} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{BO}}{C_{n-Si}}\right)}, \quad (2)$$

де $C_{BO} = 1 \dots 2 \cdot 10^{19}$ ат/см³, а $C_{nSi} = 1,1 \dots 1,2 \cdot 10^{14}$ ат/см³.

На пластинах двостороннє травлення канавок проводилося одночасно (рис. 1а) із застосуванням методів фотолітографії в стандартному травнику CP – HF:HNO₃:CH₃COOH = 1:4:0,5 на протяжні 12 хвилин. Після формування канавок створювалася ізоляція легкосплавними стеклами. Пробивна напруга U_R контролювалась на пластинах між областю кристалів та шаром ВО, який підключався до загального мінусу стенду контролю напруги пробою. Методика та результати виміру напруги приведені в роботі [11]. При аналізі результатів вимірів напруги пробою для вибірки структур приставів одного часу відпалу використовувалися максимальні значення U_{Rmax} , які корелюють із середніми значеннями U_R , але наглядніше характеризують процес відновлення кристаліграфічної довершеності монокристалу. Дослідження форми канавок після процесів травлення шарів ВО структур проводилося на електронному автоемісійному мікроскопі SUPRA 40WDS. Фотографії МПТ виконувались в режимі відбитих електронів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Під час процесу ТМ, який проходить у вакуумі, спостерігалось додаткове легування пластини атомами алюмінію, що випаровуються, як під час занурення та руху зон вглиб пластини, так і після виходу зон на фінішну її поверхню. Оскільки для легування всього об'єму ВО використовується менш ніж 1% алюмінію, який було нанесено під час формування зон ВВЗ, то решта 99% атомів випаровуються і частково пересаджуються на поверхні активних шарів н/п структур приставів та дифундують вглиб пластин [13]. Цей додатково переосаджений алюміній має поверхневу концентрацію порівняну з концентрацією дифузійного Al, який створюється за стандартною плівковою технологією. Надалі, під час другого етапу дифузії, переосаджений алюміній також дифундує вглиб пластини, що покращує концентраційний профіль плоского випрямного переходу. При стандартних умовах ТМ (1220 °С, 120 хв) післяопераційний поверхневий опір ρ_{sT} зменшується майже на порядок відносно опору ρ_s для чистих вихідних пластин і складає величину $\rho_{sT} = 125 \dots 130$ Ом/□. Таке використання процесів переосадження алюмінію є бажаним і часто необхідним [13].

З урахуванням розглянутих чинників розроблено оптимізований варіант маршруту формування н/п структур СНП:

- механічна обробка пластин (різка зливку на пластини, двобічне шліфування до потрібної товщини, відмивка, контроль);
- дифузія домішок на попередню глибину (загінка). Для діодів це одночасна дифузія алюмінію і бору з одного боку пластини і фосфору – з протилежного,

для багатшарових керованих структур – двобічна дифузія бору і алюмінію. Час відпалу t_j ;

– окислення: створення окисної плівки перед формуванням зон;

– ФК. В окисній масці єдиним рисунком відкриваються вікна під канали ТМ, а також формуються вікна під заглиблені реперні знаки для наступних суміщень. При створенні структур діодів прямої полярності фотолітографію проводять зі сторони шару з n^+ -Si; одночасною розгонкою вертикального p - n переходу ВО. Час відпалу t_{BO} . Надалі маршрут не відрізняється від того, що його наведено в численних наукових і патентних джерелах [2, 3]. Перевагою наведеного маршруту є відсутність двобічного шліфування після ТМ;

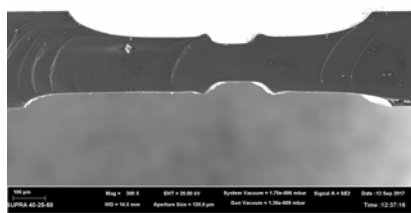
– формування зон методом ВВЗ, видалення окисної маски, проведення ТМ;

– дифузія домішок (розгонка) з доведенням глибини плоского випрямного p - n переходу до заданої з одночасною розгонкою вертикального p - n переходу ВО. Час відпалу t_{BO} .

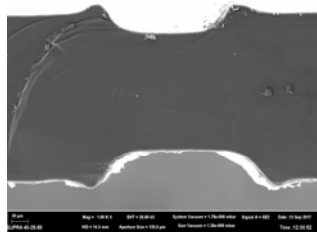
Надалі маршрут не відрізняється від того, що його наведено в численних наукових і патентних джерелах [2, 3]. Однією з переваг наведеного маршруту є відсутність двобічного шліфування після ТМ.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 4–6 наведено фото електронно-мікроскопічних зображень перерізу n/p структур із сформованими канавками в області ВО. Канавки формували після відпалу на протязі 4, 9 і 16 годин відповідно. За положенням мікрорельєфу травлення ТМ на стартовій та фінішній стороні пластини визначено кут нахилу бокових поверхонь каналу ТМ (фінішна сторона міграції домішки більш широка), який в середньому складає близько 9° .



а



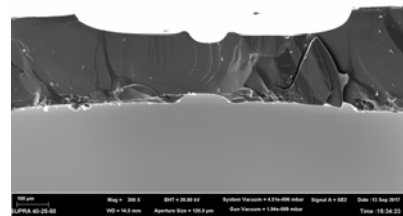
б

Рисунок 4 – Переріз пластини в області канавки з ВО після 4-х годинного відпалу:

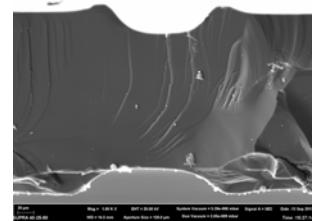
а – канавка травлення під ізоляцію легкоплавкими стеклами; б – мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si

© Кравчина В. В., Полухін О. С., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-2

Дослідження МПТ зразків з різними режимами відпалу показують, що області кремнію p^+ -Si мають локальні заглиблення ямок травлення і відповідно найбільшу відносну швидкість травлення (рис. 4–6). Концентрація легуючої домішки n -Si набагато менша і швидкість травлення n -Si менша, але найменшу швидкість травлення мають області Si(σ) по краях ТМ каналу p^+ -Si, де і утворюються виступи на поверхні у вигляді горбків (рис. 4–6). Подібна форма ТМ каналів міграції спостерігається і в інших роботах [14].

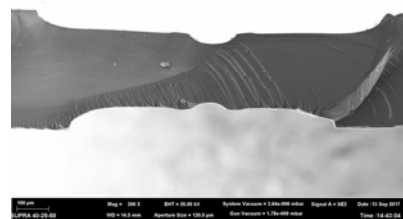


а

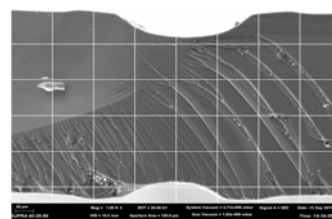


б

Рисунок 5 – Переріз пластини в області канавки з ВО після 9-ти годинного відпалу: а канавка травлення під ізоляцію легкоплавкими стеклами; б мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si



а



б

Рисунок 6 – Переріз пластини в області канавки з ВО після 16-ти годинного відпалу:

а – канавка травлення під ізоляцію стеклами; б – мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si

Виступи в $Si(\sigma)$ мають найбільшу величину, близько 12 мкм, на зразках з 4-х годинним відпалом, а найменшу ≤ 2 мкм на зразках з 16-ти годинним відпалом. Розміри виступів на зразках з 9-ти годинним відпалом займають проміжні значення. При дослідженнях проведено класифікацію особливостей МПТ канавок в залежності від режиму відпалу. При цьому визначення глибини канавок h_{n-Si} та відносні зміни поглиблень Δh_{p-Si} травлення p^+ -Si та виступів $\Delta h_{Si\sigma}$ проводилося за допомогою виразів, відповідно:

$$h_{n-Si} = (H_{Si} - H_{n-Si})/2, \quad (3)$$

$$\Delta h_{Si\sigma} = h_{Si\sigma} - h_{n-Si} = (H_{n-Si} - H_{Si\sigma})/2, \quad (4)$$

$$\Delta h_{p-Si} = h_{p-Si} - h_{n-Si} = (H_{p-Si} - H_{n-Si})/2. \quad (5)$$

При вимірах рівень h_{n-Si} визначався на відстані ≥ 30 мкм від краю виступів $Si(\sigma)$. Довжина $L_{Si\sigma}$ шару $Si(\sigma)$ визначалася за виразом:

$$L_{Si\sigma} = (L - l_{mh})/2, \quad (6)$$

де l_{mh} розраховувалася із величин початкової ширини вікон l_m (82 мкм), кута α та глибини h_{n-Si} . Величина Δl_{p-n} бокового травлення заглиблення p^+ -Si на рівні h_{n-Si} визначалася за допомогою виразу:

$$\Delta l_{p-n} = (l_{kt} - l_{mh})/2. \quad (7)$$

Величина латеральної дифузії алюмінію d_{Al} при відпалі визначалася за формулою (2).

Експериментальні дані особливостей МПТ канавок в області шару p^+ -Si та електрофізичні характеристики ізоляції, в залежності від часу відпалу приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив часу відпалу на особливості рельєфу травлення канавок та електрофізичні характеристики шару ізоляції ТМ каналу p^+ -Si

Час відпалу, хв.	Глибина травлення, мкм				$L_{Si\sigma}$, мкм	Довжина дифузії d_{Al} , мкм	U_{Rmax} , В
	h_{n-Si}	$\Delta h_{Si\sigma}$	Δh_{p-Si}	Δl_{p-n}			
240	64,5	-12	+30	28	75	50	1175
540	64	-8	+25	16	74	75	1475
960	64,5	-2	+21,5	12,5	76	100	2000

Після процесу ТМ мікрорельєф травлення області ізоляції має виступи величиною $\Delta h_{Si\sigma} = -5,2$ мкм та заглиблення $\Delta h_{p-Si} = 6,4$ мкм. При цьому за межами області ТМ відсутні об'ємні області зміни висоти горизонтального рівня травлення поверхні, які з'являються на зразках після процесів відпалу.

При травленні зразків із структурним відновленням монокристалу, яке відбувається при збільшенні часу відпалу, спостерігається зменшення МПТ. Найбільшу швидкість травлення шару ВО p^+ -Si мають зразки з мінімальним часом відпалу 4 години. Найменшу швидкість мають зразки з максимальним часом відпалу 16 годин. Величина напруги побою ВО залежить від наявності порушень між межею шару p^+ -Si та $p-n$ -переходу, який формується при відпалі.

Досить якісно ці порушення відображає величина бокового травлення Δl_{p-n} , яка зменшується 2,2 рази при збільшенні часу відпалу до 16 годин.

З таблиці видно, що оптимальним часом відпалу є відпал на протязі 16 годин. При якому спостерігаються максимальні напруги пробою, які близькі до теоретичних. Для цього режиму відпалу спостерігається перекриття шару з механічними напруженнями $Si(\sigma)$ дифузійним шаром d_{Al} домішки алюмінію, джерелом якої є області p^+ -Si. Перекриття $d_{Al} \geq L_{Si\sigma}$ починається після 12 годин відпалу, де $d_{Al} = 88$ мкм.

Тому, з точки зору формування області просторового заряду в кремнію без або з мінімальними механічними напруженнями, відпал на протязі 12...16 годин є технологічно обумовленим та необхідним.

При травленні канавок в області МПТ спостерігаються дислокаційні сліди. Канал ТМ вільний від дислокаційних слідів. На зразках з 4-х годинним відпалом і з підвищеною кількістю селективно осадженого в слайдері Al в локальних місцях в області бокового травлення Δl_{p-n} спостерігаються сліди 60° дислокацій. Такі сліди в області бокового травлення Δl_{p-n} починаються біля межі каналу ТМ. Сліди 60° дислокацій не спостерігалися на структурах, які формувалися за оптимальною технологією процесу ТМ.

5 ОБГОВОРЕННЯ

Особливості МПТ, який утворюється в процесі травлення кремнію в області ВО, можливо пояснити утворенням та трансформацією, в процесі ТМ і термічних обробок, механічних напружень та кристалографічних дефектів. Дослідження особливостей травлення шарів кремнію з механічними напруженнями та опосередкована візуалізація типу та величини механічних напружень розглядається в роботі [15]. Де показано, що кінетика процесів травлення шарів кремнію змінюється в залежності від типу та величини прикладених механічних напружень, які створювалися в кремнію плівками Si_3N_4 та SiO_2 з відповідно з механічними напруженнями стискання та розтягнення в маскованому Si. Показано, що механічні напруження розтягнення призводять до збільшення, а стискання до зменшення швидкості травлення маскованого $Si(111)$. Приведені в роботі [15] залежності кінетики травлення кремнію з механічними напруженнями дозволяють пояснити причини утворення досліджуваного МПТ. В ТМ каналі p^+ -Si внаслідок збільшення міжплощинної відстані (ковалентні радіуси для Si і Al рівняються відповідно 0,117 та 0,121 нм) відбувається збільшення об'єму та утворення механічних напружень розтягнення, які мають складові як тангенціальні, так і перпендикулярні до бокових поверхонь каналів ТМ. Напруження в p^+ -Si урівноважуються утворенням в суміжних шарах об'ємного кремнію зустрічних тангенціальних та поперечних напружень стискання, які спричинюють зміни рухливості носіїв заряду, а при їх збільшенні і утворення кристалографічних дефектів. Утворення дислокаційних напівпетель, які

розташовані за каналом ТМ, але починаються на його межі, показано в роботі [16] за допомогою рентгенівського топографування.

При дифузії атомів алюмінію, яка виникає в процесі відпалу, в ТМ каналі відбувається утворення механічних напружень розтягнення, зрушення та модифікація кристалографічних дефектів, що спричинює зростання швидкості травлення. Відповідно, напруження стискування, які виникають по периметру каналу ТМ, спричинюють сповільнення швидкості травлення та утворення горбків МПТ. Із порівняння глибин травлення табл. 1 можливо визначити, що максимальну величину механічних напружень розтягнення та концентрацію дефектів МПТ мають зразки з 4-х годинним відпалом, а мінімальну – зразки з 16-ти годинним відпалом. Процес ТМ з утворенням механічних напружень також супроводжується утворенням по периметру ВО максимумів концентрації кристалографічних дефектів, фонових та легуючих домішок, таких як фосфор, кисень та ін. [14]. У випадку незначного часу відпалу можливе зростання напружень за рахунок появи додаткових механічних напружень, спричинених дифузійною домішкою Al та формуванням *p-n*-переходу. При дифузії атомів алюмінію з області ТМ відбувається і відносно прискорене насичення ними ядер дислокацій, які розташовані по периметру каналу ТМ. Це призводить до значного локального збільшення концентрації атомів алюмінію і, додатково до дифузійних процесів легування, спричинює утворення шару кремнію з підвищеними механічними напруженнями, а в подальшому відповідно змінює швидкості травлення та спричинює утворення більш розвинутого рельєфу, що і спостерігається в експерименті. Зростання механічних напружень, дефектності в області *p-n*-переходу та провідності вздовж дислокацій, які насичені атомами Al і пронизують шар просторового заряду, можуть призводити до зменшення напруги пробією та зростання струмів просочування, як це і спостерігалось в роботі [11]. Про такий відносно максимальний рівень дефектності можуть свідчити максимальні величини бокового травлення Δl_{p-n} МПТ, які якісно корелюють з величинами $\Delta h_{Si\sigma}$ та Δh_{p-Si} .

Для отримання максимальних напруг електричного пробією ізоляції структур час відпалу повинен збільшуватися до величин, які забезпечують формування *p-n*-переходу за межами шару кремнію з механічними напруженнями Si(σ), при цьому зменшується і сама величина механічних напружень та концентрація кристалографічних дефектів, що фіксується мінімізацією МПТ. Виконання умови оптимального відпалу кристалографічних дефектів можливо задати вимогами до особливостей зміни МПТ при зміні часу відпалу, а саме вимогами мінімізації величин МПТ і в першу чергу Δl_{p-n} .

ВИСНОВКИ

Показано, що при виготовленні н/п структур приладів більшої потужності із зворотною напругою 2000 В, оптимальним є варіант маршруту, коли споча-

тку проводять процес загонки домішок глибоких активних шарів, потім при формуванні шару ізоляції проводять процес ТМ, а надалі проводять суміщений відпал як ізоляції, так і активних шарів. Таке суміщення процесів відпалу покращує характеристики структур.

В роботі розкрито особливості механізму утворення МПТ канавок в області термоміграційних каналів. Механічні напруження стискування та розтягнення, утворювані в процесі ТМ, спричинюють, відповідно, уповільнення та прискорення швидкості травлення шарів Si. Проведено аналіз впливу часу відпалу на мікрорельєф канавок травлення, де показано, що якісні зміни електрофізичних характеристик каналу ТМ та відпал дефектів супроводжується мінімізацією МПТ. При цьому відносно часу відпалу виконуються дві умови: перша, це перевищення латеральної довжини дифузії Al над латеральною довжиною області механічних напружень Si(σ); а друга, це мінімізація МПТ канавки в області каналу ТМ.

ПОДЯКИ

За розглянутою технологією виготовляється низка чипів для комплектації модулів на струм від 20 до 200 А. Так н/п структури діодів на струм 200 А використовуються при формуванні модулів МДД8/3. Ці н/п структури формують на пластинах з орієнтацією як (111), так і (100), що стало можливо завдяки проведеним дослідженням та оптимізації процесів ТМ.

Автори висловлюють щирі подяки Бортнікову Ю. М. за допомогу в проведенні електронно – мікроскопічних досліджень структур.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Blunt P. Reliable thyristors and triacs in TO220 plastic packages / P. Blunt // Electronic Components and Applications. – 1979. – Vol. 2, № 1. – P. 53–58.
2. Лозовский В. Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов / В. Н. Лозовский, Л. С. Лунин, В. П. Попов. – М. «Металлургия», 1987. – 223 с.
3. Thermomigration processing of isolation grids in power structures / T. R. Anthony, J. K. Boah, M. F. Chang et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1976. – Vol. 23, № 8. – P. 818–823.
4. Chang M. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing / M. Chang, R. Kennedy Chang M., Kennedy R. // J. Electrochem. Soc. – 1981. – Vol. 128, № 10. – P. 2193–2198.
5. Lischner D. J. Observations of the Temperature gradient zone melting process for isolating small devices / D. J. Lischner, H. Basseches, F. A. D'Alroy // J. Electrochem. Soc. – Vol. 132, № 12. – P. 2997–3001.
6. Morillon B. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration / B. Morillon et al. // ESSDERC. – 2002. – P. 327–330.
7. Полухин А. С. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов / А. С. Полухин, Т. П. Зуева, А. И. Солодовник // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 110–112.
8. Лозовский В. Н. Особенности легирования кремния методом термомиграции / В. Н. Лозовский, Л. С. Лунин,

- Б. М. Середин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 179–188.
9. Полухин А. С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов / А. С. Полухин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 97–100.
10. Deep trench etching combining aluminum thermomigration and electrochemical silicon dissolution. <https://www.researchgate.net/publication/224403308>
11. Полухин А. С. Исследование технологических факторов процесса термомиграции / А. С. Полухин // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 90–92.
12. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1988.
13. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectional / B. Morillon // Rapport LAAS №02460, 2002. – 222 p.
14. Бучин Э. Ю. Структура термомиграционных каналов в кремнии / Э. Ю. Бучин, Ю. И. Денисенко, С. Г. Симакин // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 5. – С. 70–75.
15. Горбань А. Н. Селективне травлення монокристалічного кремнію маскованого плівками нітриду, полікремнію, окису кремнію та їх композиціями / А. Н. Горбань, В. В. Кравчина // Нові технології. – 2010. – №1 (27). – С. 41–46.
16. Термомиграционные р-каналы: реальная структура и электрические свойства / [В. Н. Лозовский, А. А. Ломов, Б. М. Середин и др.] // Электронная техника. – Серия 2. – Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 2 (245). – С. 29–38.

Стаття надійшла до редакції 31.01.2018.
Після доробки 23.04.2018.

УДК 621.315.592

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОМИГРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Кравчина В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры микрорелектронных информационных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина.

Полухин А. С. – ведущий инженер ООО «Элемент- Преобразователь», Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проведенные исследования позволяют улучшить технологические процессы изготовления п/п приборов и контроль их качества.

Цель работы – разработка и совершенствование технологии СНП с использованием процессов термомиграции Al и исследование рельефа травления кремния в области p^+ -Si изоляции. Задачей работы является оптимизация технологии формирования СНП.

Метод. Объектом исследования являлись технологические особенности процессов формирования структур по различным маршрутам, отличающиеся последовательностью проведения процессов формирования активных структур, отжига структур и процессов термомиграции Al. Исследовалось влияние времени отжига на особенности микрорельефа травления канавок в области термомиграции.

Результаты. В работе проанализированы причины изменения напряжения пробоя p-n переходов вертикальных сквозных областей, созданных термомиграцией, в зависимости от времени отжига п/п структур. На образцах с оптимальным режимом отжига в 16 часов при температуре 1250 °C наблюдаются максимальные напряжения пробоя слоев изоляции и минимальные величины микрорельефа канавок травления кремния разного типа проводимости в области изоляции кристаллов сквозными термомиграционными шарами. Такой минимальный микрорельеф определяет минимум остаточных механических напряжений. Показано, что при изготовлении п/п структур приборов большей мощности и обратным напряжением 2000 В, оптимальным является вариант маршрута, когда сначала проводят процессы загонки примесей глубоких активных слоев, а затем процессы термомиграции формирования слоев изоляции. В дальнейшем проводят совмещенный отжиг слоев структуры как изоляции, так и активных. Такое совмещение процессов отжига улучшает характеристики структур.

Выводы. В работе определен оптимальный маршрут, режим отжига структур и показано, что контроль изменений кинетики травления слоев кремния в области термомиграции примеси алюминия помогает в определении оптимальных режимов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отжиг, изоляция, микрорельеф канавок, линейные зоны, термомиграция, силовые полупроводниковые приборы.

UDC 621.315.592

APPLICATION OF THERMOMIGRATION FOR TECHNOLOGY OF POWERFUL SEMICONDUCTORS APPLIANCES

Kravchyna V. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Microelectronics Information Systems, Zaporizhzhya State-owned Inzhenerenaya Academy, Zaporizhzhya, Ukraine.

Polukhin O. S. – Leading engineer, “Element- Preobrazovatel” Ltd, Zaporizhzhya, Ukraine.

ABSTRACT

Contex. The conducted researches allow to improve technological processes of manufacture of semiconductor devices and control of their quality.

Objective is to investigate the relief of silicon etching in the area of p^+ -Si isolation and using of Al-therm migration processes for further develop and improve technology of the power devises. The task of the work is to optimize these technology.

Method. The object of the study was the technological features of the processes of forming structures on different routes, differing in the manner of carrying out processes of annealing structures and processes of thermomigration Al. The influence of the annealing time on the features of the microrelief of etching grooves in the region of thermomigration has been studied.

Results. The causes of change of breakdown voltage of vertical *p-n*- junctions formed by thermomigration vs post-migration annealing time and thermomigration process optimization are discussed. On these samples is observed minimal microrelief of the groove etching of various types of conductivity silicon in the area under the insulation of the crystals. Such a minimal microrelief determines the minimum of residual mechanical stresses. The control of changes in the kinetics of etching layers of monocrystalline silicon in the field of thermal migration of aluminum impurities helps in determining the modes of technology for the formation of semiconductor structures with high breakdown electrical voltages. At the same time, two conditions are fulfilled: the first one is the excess of the lateral length of aluminum diffusion over the lateral length of the region of mechanical stresses along the perimeter of the thermo-migration region; and the second, it is a reduction and stabilization of changes in the rate of etching of the thermo-migration layers by minimizing the elastic-mechanical, deformation component of the activation energy of the etching process of p^+ -Si.

It is shown that in the manufacture of chips of larger power devices with a larger area and a reverse voltage of up to 2000 V, the optimal variant is the route variant, when the processes of impounding impurities of deep active layers are first carried out, then the processes of thermomigration during the formation of insulation layers. Then there are annealing of isolation and active layers. This combination of annealing processes improves the characteristics of structures.

Conclusions. The optimum route, the annealing mode of the structures are determined in the work, and it is shown that monitoring the changes in the etching kinetics of silicon layers in the region of thermal immigration of aluminum impurities helps in determining optimal regimes.

KEYWORDS: annealing, insulation, microrelief of the grooves, linear zones, thermomigration, power silicon devices.

REFERENCES

1. Blunt P. Reliable thyristors and triacs in TO220 plastic packages, *Electronic Components and Applications*, 1979, Vol. 2, No. 1. pp. 53–58
2. Lozovskiy V. N., Lunin L. S., Popov V. P. Zonnaia perekristalizatsiia gradientom temperatury' poluprovodnikov'y'x materialov. Moscow, «Metallurgii», 1987. 223 p.
3. Anthony T. R., Boah J. K., Chang M. F. et al. Thermomigration processing of isolation grids in power structures, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1976, Vol. 23, No. 8, pp. 818–823.
4. Chang M., Kennedy R., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing, *J. Electrochem. Soc.*, 1981, Vol. 128, No. 10, pp. 2193–2198.
5. Lischner D. J., Basseches H., D'Altroy F. A. Observations of the Temperature gradient zone melting process for isolating small devices, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 132, No. 12, pp. 2997–3001.
6. Morillon B. et al. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration, *ESSDERC*, 2002, pp. 327–330.
7. Polukhin A. S., Zueva T., Solodovnik A. I. Ispolzovanie termomigratsii v tekhnologii struktur silov'y'kh poluprovodnikov'y'x priborov, *Silovaya elektronika*, 2006, No. 3, pp. 110–112.
8. Lozovskiy V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. Osobennosti legirovaniia kremniya metodom termomigratsii, *Izvestiya vy'sshikh uchebny'kh zavedeniy. Materialy' elektronnoy tekhniki*, 2015, Vol. 18, No. 3, pp. 179–188.
9. Polukhin A. S. Termomigratsiya neorentirovanny'kh lineyny'kh zon v kremniy'kh plastinakh (100) dlya proizvodstva chipov silov'y'kh poluprovodnikov'y'x priborov, *Komponenty' i tekhnologii*, 2008, No. 11, pp. 97–100.
10. Deep trench etching combining aluminum thermomigration and electrochemical silicon dissolution. <https://www.researchgate.net/publication/224403308>
11. Polukhin A. S. Issledovanie tekhnologicheskikh faktorov protsessu termomigratsii, *Silovaya elektronika*, 2009, No. 2, pp. 90–92.
12. MOP-SBIS. Modelirovanie elementov i tekhnologicheskikh protsessov. Pod red. P. Antonneti, D. Antoniadisa, R. Dattona, U. Ouldkhema : Per. s angl Moscow, Radio i svyaz, 1988.
13. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnel, *Rapport LAAS №02460*, 2002. 223 p.
14. Buchin E. J., Denisenko J. I., Simakin S. G. Structura tekhnologicheskikh kanalov v kremnii, *Pisma v GTF*, 2004, Vol. 30, Vy'p. 5, pp. 70–75.
15. Gorban A. N., Kravchina V. V. Selekt'yvne travlennyya monokristalichnogo kremniyu maskovannogo plivkamy' nitridu, polikremniyu, oky'su kremniyu ta ikh kompozy'tsiyamy', *Novi tekhnologii*, 2010, No. 1 (27), pp. 41–46.
16. Lozovskiy V. N., Lomov A. A., Seredin B. M., Simakin S. G., Zinchenko A. N., Seredina M. B. Termomigratsionny'e p-kanaly': realnaya struktura i elektricheskie svoystva, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory'*, 2017, Vy'p. 2 (245), pp. 29–38.