

4. Сундучков, А. К. Межканальная интерференция и метод оценки ее влияния на прием сигнала [Текст] / А. К. Сундучков, Е. А. Остроупская, Е. А. Фадеева, К. С. Сундучков // Электроника и связь. – 2010. – № 4. – С. 202–206.
5. Пелішок, В. О. Вибір виду модуляції для забезпечення основних вимог в безпроводних системах [Текст] / В. О. Пелішок // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – № 2 (10). – С. 25–31.
6. Васильев, В. Г. Технология широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004 [Текст] / В. Г. Васильев. – Юнидата, 2009. – 91с.
7. Михалевський, Д. В. Дослідження потужності сигналу приймачів стандарту Wi-Fi [Текст] : матер. між. наук.-практ. конф. / Д. В. Михалевський // Актуальные проблемы современной науки и пути их решения. – Знання України, 2014. – С. 29–31.
8. Wescott, D. A. CWAP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide: Exam PW0-270 [Text] / D. A. Wescott, D. D. Coleman, P. Mackenzie, B. Miller. – Wiley Technology Pub., 2011. – 712 p.
9. Гепко, И. А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития [Текст] / И. А. Гепко, В. Ф. Олейник, Ю. Д. Чайка, А. В. Бондарко // Киев: ЭКМО, 2009. – 672с.
10. IEEE Std 802.11-2007. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [Text] / Int.2007-06-12. – IEEE, 2007. – 1076 p.
11. Карпов, А. В. Методика визначення загального рівня опромінення персоналу в сучасному інформаційному просторі [Текст] / А. В. Карпов, Г. Ф. Кнахович, Г. С. Конахович, Р. С. Одарченко // Наукоемні технології, Науковий журнал НАУ. – 2010. – № 2. – С. 116–121.
12. Мелихов, С. В. Оценка чувствительности радиоприемников с настренными антеннами [Текст] / С. В. Мелихов, В. А. Кологривов // Доклады ТУСУРа. – 2006. – № 6. – С. 63–67.

В даній статті розглянуті фізичні основи способів створення структур кремній на ізоляторі (КНІ) та арсенідгалію на ізоляторі (АГНІ) різними методами. Основна увага надана методу «DeleCut» (ion irradiated Deleted oxide Out). Останній по суті є модифікацією відомого методу «SmartCut» і призначений для усунення недоліку базового методу

Ключові слова: метод DeleCut, метод SmartCut, К-МОН, багатозарядна імплантація, оксинітрид, азотна сушка

В данной статье рассмотрены физические основы способов создания структур кремний на изоляторе (КНИ) и арсенидгаллия на изоляторе (АГНИ) различными методами. Основное внимание уделено методу «DeleCut» (ion irradiated Deleted oxide Out). Последний, по сути дела, является модификацией известного метода «SmartCut» и предназначен для устранения недостатка базового метода

Ключевые слова: метод DeleCut, метод SmartCut, К-МОП, многозарядная имплантация, оксинитрид, азотная сушка

1. Вступ

Метод DeleCut дозволяє суттєво знизити температуру відпалу та концентрацію радіаційних дефектів в структурах КНІ і АГНІ, зменшити товщину відсіченого шару кремнію чи арсеніду галію та перехідного шару між шаром (КНІ) або (АГНІ) і захованого оксиду (оксинітриду). Одночасно досягається збільшення однорідності товщини шарів КНІ або АГНІ і діелектрика (напівізоляваного напівпровідника) до декількох нанометрів.

Методами DeleCut та багатозарядною імплантацією створені структури КНІ з бездислокаційними ша-

рами КНІ товщиною 0,1–0,5 мкм із захованим оксидом (оксинітридом) (0,05–0,3 мкм) на пластинах Чохральського діаметром до 150 мм. Структури КНІ (АГНІ) мають високі електрофізичні характеристики, які підтверджуються виготовленням на них субмікронних (0,5–0,7 мкм) транзисторів КМОН та тестових інтегральних схем (тестових структур).

2. Аналіз досліджень і публікацій

Відомо що перехід від кремнієвих пластин, в тому числі з епітаксійним шаром, на структури КНІ при

УДК 621.382

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31582

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ КРЕМНІЙ- ТА АРСЕНІД ГАЛІЮ НА ІЗОЛЯТОРІ

С. П. Новосядлий

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

Л. В. Мельник

Аспірант*

E-mail: lj-3d@rambler.ru

*Кафедра комп'ютерної

інженерії і електроніки

Прикарпатський Національний

університет ім. В. Стефаника

вул. Шевченка, 57,

м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

виробництві великого класу напівпровідникових приладів і мікросхем дає великі переваги в порівнянні з об'ємним матеріалом, зокрема зниження споживаної потужності, підвищення радіаційної стійкості та швидкодії. З початку сімдесятих років розвиток мікроелектронної техніки іде за законом Мура – продуктивність мікропроцесорів подвоюється кожні 15–18 місяців, а мінімальний розмір елементів швидко наближається до 50 нм та перемикаючий заряд знижується до 800–1000 електронів [1, 2]. Незважаючи на успіхи окремих фірм (Intel, NEC, Lecent Technology, Philips) в зменшенні розмірів елементів (<150нм), фізичні межі (квантові ефекти і невизначеність в поведінці малих струмів через тунелювання) та технологічні проектні норми КТО (обмежена потужність розсіювання, щільність топології та величина тунельного струму) можуть суттєво загальмувати процес мінімізації на основі масштабного зменшення розмірів елементів в рамках стандартної технології разом з надмірно зростаючими витратами на розвиток радіаційної стійкості К-МОН – технології на арсенідігалію різко зменшують бар'єри по впровадженні альтернативних приладних концентрацій на базі нових матеріалів, (GaAs) та нових технологічних процесів [3].

Використання КНІ зменшує дожину каналу МОН – транзистора до 15 нм, а діапазон подвійного затвору дозволяє досягти каналу на рівні 10 нм. Сьогодні у світі використовуються два основних методи створення пластин КНІ (Silicon on Isolation – SOI), імплантаційний метод – впровадження на глибину кристалу іонів кисню (O_2^+) – Silicon Implanted by Oxygen – SiMOX з наступним синтезом захищеного оксиду при відпалі та метод водневого переносу кремнію з оксидом (SmartCut SOI), який полягає в прямому зрощуванні опроміненої воднем донорної окисленої пластини кремнію з опірною підкладкою з наступним майже повним видаленням донорної пластини шляхом її сколу імплантаційним відпалом [4].

Пластини КНІ, які виготовлені за допомогою цих двох методів, знайшли комерційне застосування незважаючи на те, що їх ціна 5–6 разів є більшою ціни пластин кремнію того є діаметру. Справа в тому, що тільки цими методами вдається забезпечити вимоги субмікронної технології при товщині відсіченого шару КНІ менше 100 нм [5].

Найбільш близькими до застосованого нами способу створення КНІ є відомий метод SmartCut, який був запропонований М. Брюелем. Фінішними операціями в методі Брюеля після переносу шару кремнію з оксидом на опірну підкладку є високотемпературна обробка-відпал при $T=1100-1200$ °C, яка покращує параметри структур КНІ за рахунок відпалу радіаційних дефектів в кремнії, які захоронені в SiO_2 , видаленням захищеного водню та закріплення зв'язків нам межі зрощування [6, 7].

Остання операція полягає в прицезійному поліруванні структури КНІ до чистоти V14, що видаляє 0,1–0,25 мкм верхнього шороховатого, але є дефектами шару монокремнію.

Метод даних досліджень – розробка методів формування пластин КНІ або АГНІ із властивостями відсіченого шару кремнію чи арсеніду галію і захищеного діелектрика чи напівізолюючого напівпровідника, які б не уступали властивостям епітаксійного чи об'ємного

матеріалу і термічного оксиду, а також розробка сучасної технології і виготовлення субмікронних (0,25–0,6) мкм КНІ КМОН транзисторів для вивчення особливостей технологічного процесу і діагностування електrofізичних параметрів на основі тестових структур технологічної САПР.

3. Формування цілей і задач

Виходячи із літературних джерел сьогодні основною проблемою технології кремній на ізоляторі є низька відтворюваність параметрів при використанні високотемпературної технології синтезу і відшарування шару моно Si в атмосфері водню.

Для формування шарів арсенід галію на ізоляторі досліджена і запропонована технологія багатозарядної імплантації хрому, що формує міжшарову ізоляцію та багатозарядна імплантація, H^{++} , V^{++} та O^{++} забезпечує локальну ізоляцію.

Ці дві високоефективні технології забезпечують формування КМОН на Si і КМДН на арсеніді галію як з використанням МДН-транзистора так і транзисторів Шоттки.

3.1. Дослідження процесів та механізмів зрощування, відшарування і переносу в пластинах кремній на ізоляторі

Процес зрощування пластин кремнію можна подати у вигляді двох етапів:

- 1) з'єднання пластин планарними сторонами всередину за рахунок сил Ван-дер-Вальса та дипольної взаємодії абсорбованих на поверхні радикалів;
- 2) нагрів цієї з'єднаної пари при підвищенні температури (800–1200 °C) для заміни слабких мікромолекулярних зв'язків міцними ковалентними.

Найбільш важливою проблемою в процесі зрощування є відсутність областей контакту, в локальних місцях (макро – і мікропустоти та нерівності поверхні), які зменшують силу взаємодії між пластинами кремнію і вихід придатних. А друга вимога до процесу зрощування – це висока чистота поверхонь пластин, що зрощуються. Ці вимоги особливо актуальні сьогодні для великих діаметрів пластин >76 мм.

Існує багато способів хімічної очистки пластин Si, але найбільш поширеною є так звана RCA-очистка, тобто обробка в перекисно-аміачному розчині ($NH_4OH:H_2O_2:H_2O=1:1:4$), зняття природнього оксиду в розбавленій плавиковій кислоті HF (буферний травник) і обробка в перекисно кислотному розчині ($HCl:H_2O_2:H_2O=1:1:4$). RCA обробка застосовувалась в даній роботі. Після кожної операції виконувалась фінішна промивка киснем в деіонізованій воді марки А та центрифужній азотній сушці. Зрощування проводилось між гідрофільними поверхнями, отриманими обробкою в перекисно-аміачних розчинах різного співвідношення, які б мали контактний кут змочування для кремнію і для SiO_2 від 0 до 6–8°. Після гідрофілізації проводилась, як відмічалось вище, сушка на центрифугі в азотній атмосфері та з'єднання пластин в пари на спеціальній установці зрощування «Радикал–2». Якість зрощування контролювалась по зображенню на просвіт в ближньому ІЧ-діапазоні за допомогою ПЗС – камери.

Основою технології водневого переносу є ефект формування на глибині проектного пробігу іонів водню R_p мікротріщин розміром до 80–100 нм, в яких при наступній термообробці проходить вже накопичення газоподібного водню, що приводить до підвищеного тиску в мікротріщині, її росту і до відокремлення плівки кремнію від решти кристалу. В порушеному іонами водню шарі кремнію після відпалу при 450–820 °С утворюються уже мікротріщини до 0,8–1 мкм. Характерною особливістю водню є його активна взаємодія з домішками і дефектами. В результаті водень захоплюється на вже розтягнуті та ослаблені зв'язки Si-Si на краях мікротріщин. Розміри таких тріщин збільшуються по мірі накопичення водню, проходить повний розрив зв'язків і формування так званих куполів (блістерів) на поверхні розмірами 10–45 мкм (рис. 1) (ніби пазурів).

Поява таких куполів спостерігається при відпалі імплантованого воднем кристалі, починаючи з дози 1–10 мккул/см² при енергії 30–85 кеВ. Подібний рельєф на поверхні може також утворюватись при імплантації багатозарядними іонами H_2^{++} . Таким чином, існує деякий інтервал доз і енергій, всередині якого не проходить порушення поверхні, в процесі опромінення і в той же час концентрація водню вже є достатньою для відшарування кремнію при відпалі. Такий інтервал доз водню як однозарядних, так і двозарядних залежить від температури опромінення (250–380 °С).

Якщо поверхня опроміненого воднем кристалу покрита механічно міцною плівкою (типу ХСЛ) або з'єднати з другою пластиною, то формування високих куполів (пазурів) буде подавлено, а тріщини будуть розвиватись переважно паралельно поверхні, що приводить до повного відшарування плівки від решти кристалу [8].

Розглянемо кінетику процесу формування блістерів і відшарування плівок при наступному відпалі згідно даними ІЧ-спектрографії. Досліджувались при цьому спектри ІЧ-поглинання Si-H – зв'язками в кремнії, який опромінений іонами водню H_2^+ або H_2^{++} . Пластини кремнію р-типу (КДБ-10) з концентрацією бору 10^{14} см⁻³, товщиною 400 мкм, діаметром 100 мм, орієнтацією (100) опромінювалась іонами водню з енергіями 35–120 кеВ (проектний пробіг $R_p = 0,6$ мкм до доз в інтервалі $(0,1-8) \cdot 10^{16}$ см⁻²).

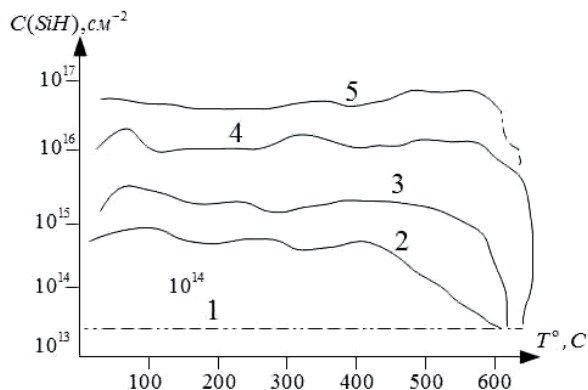


Рис. 1. Зміна концентрації Si-H – зв'язків при відпалі імплантованого воднем (H_2^{++}) кремнію КДБ-10 (см⁻²):
 1 – мінімальні значення; 2 – $8 \cdot 10^{14}$, 3 – $2 \cdot 10^{15}$,
 4 – $(1-2) \cdot 10^{16}$, 5 – $(6-7) \cdot 10^{16}$

Спектри поглинання опроміненого кремнію містять велике число ліній в області 1800–2300 см⁻¹. Ці лінії звичайно зумовлені поглинанням пружними модами Si-H – зв'язків атомів водню, який насичує обірвані зв'язки різних вакансійних і міжвузлових компонентів. Трансформація спектру ІЧ в області поглинання Si-H зв'язків вказує на зміну концентрації їх при відпалі імплантованого воднем кремнію протягом 30 хв, що подано на рис. 1.

При дозах $> 8 \cdot 10^{16}$ см⁻² після відпалу при T=300 °С протягом 1 год практично весь імплантований водень вже є хімічно зв'язаний з кремнієм.

При вибраних умовах опромінення та відпалу блістери спостерігаються тільки на пластинах кремнію, опроміненими дозами більшими $4 \cdot 10^{16}$ см⁻². Саме в інтервалі $((1-5) \cdot 10^{16}$ см⁻²) при високотемпературних прогрівах (T=450–580 °С), на установці «Імпульс-3» протягом 30–70 хв в спектрах ІЧ поглинання появляються лінії моногідридів, які покривають поверхню тріщин всередині пластин кремнію.

Порівняння положень ліній спектру моногідридів для пластин з орієнтацією (111) та (100) дозволяють стверджувати, що при даних дозах імплантації тріщини орієнтуються в основному паралельно поверхні.

3. 2. Особливості технології формування КНІ МОН-транзисторів

Виготовлені методом DeleCut пластини КНІ структур тестувались шляхом формування на них транзисторних структур. Для цього була розроблена топологія тестового кристалу. Сам тестовий кристал включає в себе 26 тестів n- і р-канальних транзисторів як з лінійною, так і кільцевою геометрією. Транзистори мали 3 варіації за довжиною каналу: 15; 0,5; 0,3 мкм, щоб можна було зафіксувати субмікронні ефекти. Змінювались також доза імплантації в базовий шар транзистора.

Для формування короткоканальних транзисторів були виготовлені ПФО, що забезпечували довжину каналу 0,5 і 0,3 мкм після фотолітографії по полікремнієвому затворі. На рис. 2 подано зображення полі-Si затвору, отриманого в скануючому електричному мікроскопі. Як бачимо із рис. 2 затвор має Т-подібну форму. Зліва за вертикальною перемичкою p^+ – область контакту до базової області n-канального транзистора. Перемичка має ширину 3 мкм. Для вибору рівня легування базового шару було проведено комп'ютерне моделювання проектуючих короткоканальних транзисторів в системі САПР TCAD.

Також була розроблена програма, що давала розв'язок двовимірного рівняння Пуассона. За допомогою даної програми знаходилась величина потенціалу ϕ у всіх точках відсічення шару моно-Si між витоків і стоком МОН-транзистора. Далше обчислювалась концентрація вільних носіїв заряду і провідність даного шару моно-Si при отриманих малих струмах.

На основі розрахунку був вибраний рівень легування в n-канальному транзисторі атомів бору (B^+), а в p-канальному атомів фосфору (P^+), чи мишіяку (As^+), при якому провідність шару не перевищувала $2 \cdot 10^{-11}$ см/мкм при нульовій напрузі на затворі і довжині каналу 0,5 мкм. Така величина відповідає струму втрат, що не перевищував $4 \cdot 10^{-10}$ А при ширині каналу 20 мкм.

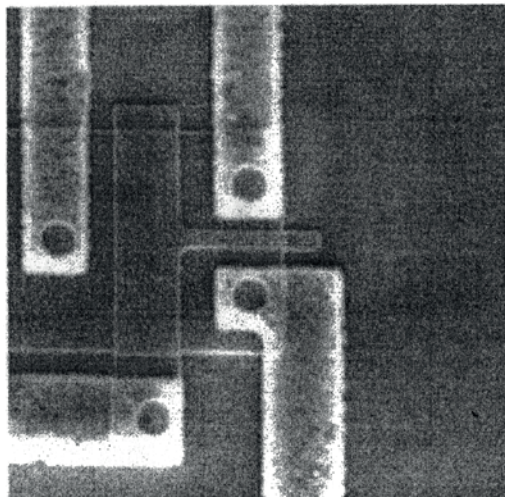


Рис. 2. Зображення КНІ МОН – транзистора в скануючому електронному мікроскопі (Розмір зображення 20x20)

Для створення шару відсіченого моно-Si товщиною 100 нм на пластинах КНІ декілька разів вирощувався термічний оксид, який потім видалявся. Товщина шару діоксиду кремнію вимірювалась еліпсометром ЛЕМ-3.

Найбільш очікуваним результатом стало зниження ефективності рухливості електронів і дірок по мірі зменшення довжини каналу. На контрольній пластині, на якій транзистори виготовлювались вже в об'ємному матеріалі також спостерігалось зниження ефективності рухливості μ_{ef} від 550 до 175 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ при зменшенні довжини каналу від 15 до 0,3 мкм. Рухливість в об'ємному матеріалі зменшувалась в 3 рази, а на пластинах КНІ в 6 разів. Така різниця пояснюється різними умовами для дифузійних процесів та відпалу дефектів в КНІ та об'ємному моно-Si. Тому причиною зниження рухливості носіїв заряду в КНІ є залишкові дефекти, що дифундують при відпалі із областей витоку і стоку в області каналу транзистора. Тут доцільно було б використовувати гетерну технологію при формуванні підзатворного діелектрика, замінивши термічний SiO_2 на оксинітрид кремнію, а полі-Si на силіцид кремнію.

4. Особливості багатозарядної імплантації: технології багатозарядної імплантації азоту і кисню для формування структур кремній на ізоляторі.

Метою досліджень була розробка технології формування КНІ структур, в якій були б відсутні недоліки, які були викладені вище та зменшення ціни на такі структури, а саме використання для цього багатозарядної імплантації: вибір джерела імплантації та оптимізація технологічних процесів іонного легування (імплантації і відпалу) для формування якісних ізолюючих захованих та гетеруючих областей оксинітриду кремнію для його можливого використання як для діелектричної ізоляції КНІ структур, так і для спейсерів.

Вперше оксинітрид був сформований автором високочастотним магнетронним розпиленням кремнієвої мішені в азотно-аргонній плазмі для формування

зовнішнього гетера при формуванні структур прицевійних операційних підсилювачів. В даній статті оксинітрид повинен виконувати не тільки гетеруючу роль домішок і дефектів, але і ізолюючу роль як діелектрика.

Тому для його формування був вибраний метод високоенергетичної багатозарядної імплантації кисню і азоту, щоб за допомогою енергії іонів формувати заховані шари на різній глибини кремнієвих підкладок, на яких формуються субмікронні структури ВІС. [8]

Відповідно для зменшення енергії та дози опромінення автори вибрали газоподібне джерело у вигляді молекулярного оксиду азоту (N_2O), бо є неутруйною і неспалахуючою сумішшю. Як і кисень чи азот за допомогою технології очистки можна досягти високої степені чистоти як за точкою роси (-75°C) так і вмістом газоподібних домішок ($<10^{-4}\%$) [6]. Крім цього, газоподібне джерело дозволяє формувати багатозарядні молекулярні пучки, які складаються із однозарядних радикалів (N_2O^+), або двозарядних (N_2O^{++}). В чому полягають переваги багатозарядної імплантації?

- енергія імплантованих багатозарядними іонами $E = (U_{\text{вит}} - U_{\text{приск}}) \cdot n$, де $U_{\text{вит}}$ – витягуюча напруга, $U_{\text{приск}}$ – прискорююча напруга, n – кратність заряду іона, дозволяє імплантувати не тільки іони, але і радикали на досить великі глибини $>0,5$ мкм.

- дози імплантованих іонів визначаються співвідношенням $D_n = D \cdot R$, де D – доза однозарядних іонів.

- струм масепаратора при легуванні багатозарядними іонами визначається як, $I_n = I_c / \sqrt{n}$, де I_c – струм сепаратора однозарядним іонів.

Відхилення зарядженої частини в магнітному полі сепаратора визначається виразом:

$$R = \frac{143,95}{H} \sqrt{\frac{MU}{n}}, \quad (1)$$

де R – траєкторія іона, H – напруженість магнітного поля сепаратора; U – витягуюча напруга у В; M – маса іона у відносних одиницях; n – кратність заряду електрона [7].

Багатозарядна імплантація радикальних іонів дозволяє використовувати існуючі імплантатори «Везувій-9» чи «Лада-30» і дозволяє створювати ретроградні (неоднорідні) концентрації домішок. Для експерименту автором вибирались підкладки моно-Si КЕФ 4,5 (100) діаметром 100 мм. Для імплантації використовувались молекулярні (радикальні) пучки N_2O^+ та N_2O^{++} з енергіями 150–400 кеВ. Іонна імплантація проводилась в центральну частину пластини з діаметром опроміненої області 25–30 мм з метою порівняння електрофізичних параметрів до і після імплантації та відпалу.

Таким чином, багатозарядні радикальні іони N_2O^{++} вибрані автором, бо забезпечують синтез оксинітриду кремнію при менших енергіях і дозах, ніж однозарядні іони кисню чи азоту, а для їх відпалу потрібна вже менша енергія активації, що є важливим для зменшення часу дифузійних процесів.

Струм пучка однозарядних радикалів N_2O^+ складав 150 мкА (густина в $1,5 \text{ мкА}/\text{cm}^2$) і для двозарядних радикалів $\text{N}_2\text{O}^{++} < 25 \text{ мкА}$ ($< 1 \text{ мкА}/\text{cm}^2$). Доза імплантації варіювалась в діапазоні $1 \cdot 10^{16} - 2,8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Перед імплантацією підкладки моно-Si покривались захисним шаром SiO_2 товщиною 10 нм (100 Å). Відпал

структур для активації синтезу проводився як високо-температурною обробкою, так і швидким імпульсним відпалом за допомогою установки фотонного відпалу «Імпульс-3» в атмосфері аргону.

Властивості отриманих захованих оксинітридних шарів досліджувались методами інфрачервоної спектроскопії (ІЧ), електронної Оже-спектроскопії, вторинної маспектроскопії (ВІМС) та вимірювання вольтамперних характеристик. ІЧ – спектри знімалися для досить великого температурного діапазону (-60–+150 °С) на установці *Spricold-82* в діапазоні хвильових чисел 650–1250 cm^{-1} . Для отримання концентраційних профілів атомів кисню і азоту ЕОС з пошаровим травленням визначалась глибина формування захованих шарів. За допомогою інтерферометра МІІІ-11 та еліпсометра ЕМ визначався коефіцієнт заломлення отриманих, захованих шарів [9].

Аналіз спектрів ІЧ-поглинання, що поданий на рис. 3, а показує, що безпосередній результат імплантації однозарядних молекулярних іонів N_2O^+ в *Si* – підкладки через оксид SiO_2 дає нітрид кремнію Si_3N_4 , а фаза оксиду була практично відсутня. В результаті відпалу при $T=1000^\circ\text{C}$ протягом 1 год вихід даної фази спостерігається вже утворюється діелектрична фаза оксинітриду $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$. Максимальний вихід даної фази спостерігається вже при дозі $(8-10)\cdot 10^{16}\text{cm}^{-2}$ рис. 3, б при зміні коефіцієнта заломлення від величини 2,1 до 1,75–1,95. Порівнюючи амплітуди спектрів пропускання $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ (із рис. 3, в) видно, що збільшення дози не веде до пропорційного росту амплітуди, а значить фази $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$.

Таким чином, при просторовому розділенні імплантованих іонів азоту і кисню, обумовлених різницею фаз, існує оптимальна доза імплантованих однозарядних радикальних іонів N_2O^+ вихід реакції синтезу $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ вже є максимальним [10].

При тому не тільки кількість імплантованих радикалів визначає характер реакції синтезу. На рис. 3, г приведений ІЧ – спектр пропускання в *Si*, імплантованого іонами N_2O^+ з дозою $2,8\cdot 10^{17}\text{cm}^{-2}$ та підданому багатоступеневому ізотопному відпалі при 400, 600, 800 і 1000 °С.

В результаті такого відпалу отримана суміш фаз Si_3N_4 і SiO_2 , але це не $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, як це мало місце при одноступеневому відпалі (рис. 4, а). Тобто, на реакцію синтезу оксинітриду кремнію впливає і сам режим відпалу імплантованих радикальних іонів.

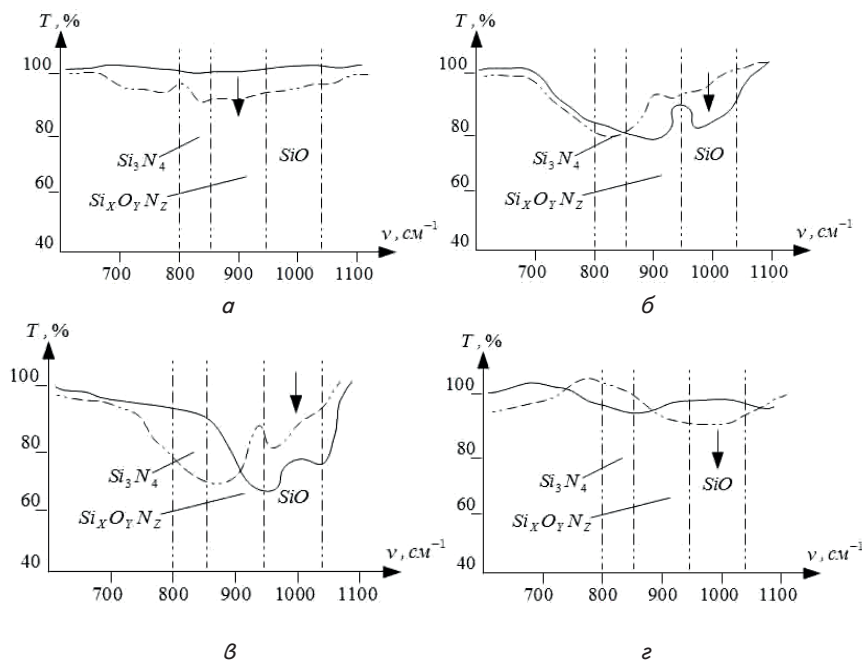


Рис. 3. Спектр ІЧ-поглинання *Si*-пластин КЕФ-4,5 опромінені радикальними однозарядними молекулярними іонами N_2O^+ , дозами cm^{-2} : а – $8\cdot 10^{16}$; б – $8,8\cdot 10^{15}$; в, г – $2,8\cdot 10^{17}$. Штрихована лінія – до відпалу, суцільна – після відпалу (а, б, в) – одноступеневий відпал; г) багатоступеневий відпал ($E=195\text{keV}$)

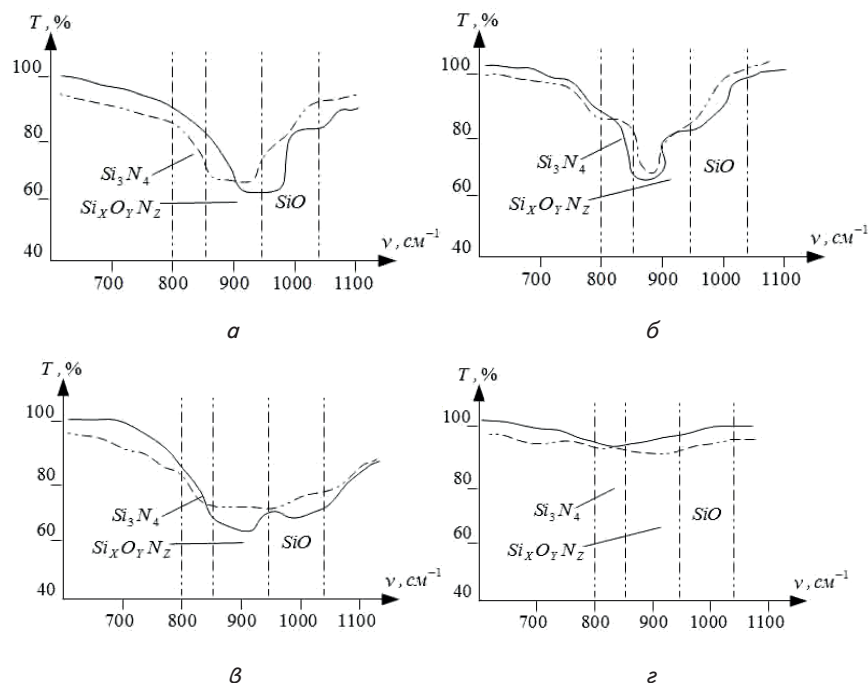


Рис. 4. Спектр ІЧ-поглинання *Si*-пластин КЕФ-4,5 (100) опромінені радикальними однозарядними молекулярними іонами N_2O^{++} , дозами cm^{-2} : а – $1\cdot 10^{16}$; б – $4\cdot 10^{16}$; в, г – $1,4\cdot 10^{17}$. Штрихована лінія – до відпалу, суцільна – після відпалу (а, б, в) – одноступеневий відпал; г) багатоступеневий відпал ($E=390\text{keV}$)

Для порівняння автором була проведена імплан- тація уже двозарядних радикальних іонів N_2O^{++} при дозах в 2 рази менших, ніж для N_2O^+ рис. 4, б, але з енергією в 2 рази більшою, тобто при 380–400 кеВ [11].

Результати експерименту подані на рис. 4, в. Як бачимо із ІЧ-спектрів на даному рисунку, багатозарядна радикальна імплан- тація іонів N_2O^{++} із швид- ким фотонним (імпульсним) відпалом при 1100 °С рис. 4, г протягом 1–3 с синтезує високоякісний ізолю- ючий оксинітрид $Si_xO_yN_z$ з коефіцієнтами заломлен- ня $n=1,73-1,89$, але на більшій глибині від поверхні моно-*Si* пластин в порівнянні з однозарядними моле- кулярними іонами N_2O^+ .

КТЛР для таких шарів складає $(3,2-3,5) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, що є дуже близьким до *Si* ($3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Слід звернути увагу на рівень розтягуючих пружних напружень, які відповідають за гетерні властивості оксинітридних плівок, величина яких складає (80–120 ГПа) і теж можна змінювати цю величину за рахунок величини імпульсного фотонного відпалу. При збільшенні часу відпалу до 10–15 с величина пружних напружень зменшується.

Таким чином сформований захований оксині- тридний шар виконує двояку роль (як ізолюючий, так і гетеруючий) при формуванні субмікронних КНІ – структур [12]. Перевага даної технології поля- гає в тому, що відпадає необхідність в рекристалізації полікремнієвого шару в моно – *Si* у водні, а фор- мування ізолюючого та гетеруючого оксинітридного шару відбувається радикальною імплан- тацією N_2O^+ , N_2O^{++} з дозами $< 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³, які не спричиняють ве-

ликої дефектності активних структур. Як бачимо така технологія знижує ціну, як мінімум, на порядок, а її можна застосувати локально, формувати комбіновані ВіКМОН, КНІ структури.

5. Висновки

Розроблена технологія багатозарядної молекуляр- ної іонної імплан- тації, яка дозволяє при низькій тем- пературі формувати якісні шари монокремнію на ізо- ляторі $Si_xO_yN_z$ (оксинітриду).

1. Переваги технології DeleCut в порівнянні з тех- нологією SmartCut зв'язані з використанням в ролі захованого діелектрика термічного оксиду на неопро- міненій пластині. Це дозволяє уникнути його радіа- ційного ушкодження.

2. Матеріал затвору, час життя основних носіїв заряду, стан базової області, товщина відсічного шару моно-*Si*; напруга на протилежному затворі, довжина каналу.

3. Розроблена технологія формування КНІ струк- тур з використанням багатозарядної радикальної ім- план- тації, що дозволяє як мінімум, на порядок знизити ціну КНІ – структур та забезпечити їх високу якість.

4. Проведені порівняльні аналізи електрофі- зичних параметрів різних технологій формування КНІ – структур для оптимального вибору топології їх формування, які показали, що дані технології дозво- ляють значно пришвидшити процес їх виготовлення і цим самим здешевити виробництво.

Література

1. Коледов, Я. А. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование [Текст]: учеб. пос. для вузов / Я. А. Коледов, В. А. Волков, Н. К. Докучаев; под ред. П. А. Коледова. – М.: Высшая школа, 1992 – 231 с.
2. Чистяков, Ю. Д. Технология СБИС [Текст]: в 2-х кн. / под ред. С. Зи; пер. с англ. Ю. Д. Чистякова. – М.: Мир, 1986. – Кн. 2. – 455 с.
3. Айнспрук, Н. У. Арсенид галлия в микроэлектронике [Текст] / У. Уисмен, У. Френсли, У. Дункан и др.; под ред. Н. Айнспру- ка, У. Уисмена; пер. с англ. под ред. В. Н. Мордковича. – М.: Мир, 1988. – 554 с.
4. Ди Лоренцо, А. В. Полевие транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления [Текст] / под ред. А. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола; пер с англ. под ред. Г. В. Петрова. – М.: Радио и связь, 1988. – 489 с.
5. Ватанаба, Н. Проектирование СБИС [Текст] / Н. Ватанаба, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки; пер с англ. под ред. Л. В. Поспе- лова. – М.: Мир, 1988. – 304 с.
6. Новосядлий, С. П. Суб-наномікрона технологія структур ВіС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Місто НВ, 2010. – 456 с.
7. Новосядлий, С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВіС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Сімик, 2003. – С. 52–54.
8. Новосядлий, С. П. Радіаційна технологія при формуванні, субмікронних структур ВіС [Текст] / С. П. Новосядлий // Металофізика і новітні технології. – 2002. – № 7. – С. 1003–1013.
9. Новосядлий, С. П. Формування кремнієвих епітаксійних структур для суміщених Ві – К – МОН і Д – МОН технологій ВіС [Текст] / С. П. Новосядлий // Металофізика і новітні технології. – 2002. – Т. 24, № 3. – С. 353–365.
10. Березин, А. С. Технология конструирования ИС [Текст] / А. С. Березин, О. Р. Моголкин. – М.: Дис. – 1992. – 254 с.
11. Алексеенко А. Г. Основы микросхемотехники [Текст] / А. Г. Алексеенко. – М.: Лаб. баз знаний. – 2002. – 286 с.
12. Павлов, В. М. Схемотехника аналогових схем [Текст] / В. М. Павлов, В. М. Ночин. – М.:Гор.мик-техника. – 2001. – 320 с.