

**Ю.В. Голтвянський, О.Й. Гудименко, О.В. Дубіковський,
О.І. Любченко, О.С. Оберемок, Т.М. Сабов, С.В. Сапон,
К.І. Чуніхіна**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ФОТОДІОДІВ В InSb ПРИ ІОННІЙ ІМПЛАНТАЦІЇ БЕРИЛІЮ

Описано процеси формування діодних структур у монокристалах антимоніду індію. Розглянуто два варіанти конструкції фотодіодних структур: планарний діод та мезаструктура. Показано, що вибрані технологічні параметри (доза імплантації берилію, енергія імплантації, режими відпалів) забезпечують формування структур, чутливих до інфрачервоного випромінювання. Запропонована технологія мезаструктур має такі переваги: зворотні струми для планарного діода є значно більшими, діоди з мезаструктурою мають більшу чутливість і значно менші темнові струми.

Ключові слова: фотоприймач, InSb, мезаструктура, іонна імплантація, ВІМС.

1. ВСТУП

Фотоприймачі, чутливі в середній ділянці інфрачервоного спектра, широко використовуються для реєстрації теплового випромінювання в медичній, військовій, аерокосмічній галузях [1]. Як правило, фотоприймачі виготовляються на основі вузькозонних напівпровідників і являють собою фотодіодні структури чи матриці. Одним з найбільш перспективних матеріалів для виготовлення фотоприймачів є монокристалічний антимонід індію (InSb), в якому створюється *p-n* перехід шляхом легування електрично активними домішками магнію або берилію [2-6]. Оскільки такі кристали не є термостабільні, то використання термічної дифузії для легування не є доцільним. Зазвичай, використовується метод іонної імплантації з наступним низькотемпературним відпалом. Основними етапами виготовлення InSb фотодіодів є підготовка поверхні вихідної підкладки, формування локального *p-n* переходу імплантацією іонів берилію з наступним відпалом, нанесення пасивуючого та захисного діелектрика, формування контактів [7, 8]. Для виготовлення фотодіодів найчастіше застосовуються об'ємні монокристали *n*-типу провідності з концентрацією електронів в інтервалі $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і рухливістю $(2 \dots 6) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$.

Розробка оптимальної конструкції фотоприймача на основі вузькозонного напівпровідника антимоніду індію, створення технологічної маршрутної карти і замкнутого технологічного циклу виготовлення приладів з відповідними характеристиками вимагають вирішення ряду завдань, що включають дослідження структурних та електрофізичних параметрів матеріалу після окремих технологічних операцій. Зокрема, вивчення процесів утворення дефектів у залежності від дози імплантації показало необхідність використання двостадійної імплантації (два значення енергії імплантації), оптимізації дози імплантації та режимів термовідпалу [3]. Сегрегація атомів Sb та дефектоутворення на межі поділу SiO_x -InSb при термообробках вимагають точного контролю режимів швидкого фотонного відпалу з програмним управлінням тривалості та температури відпалу [9-12]. Особливу увагу необхідно приділити вибору типу пасивуючих та просвітлювальних покриттів та режимів їх нанесення. Специфіка властивостей антимоніду індію та його оксидів (провідність при підвищених температурах) потребує розробки низькотемпературних процесів нанесення діелектричних шарів з високою адгезією і стабільністю властивостей при кліматичних випробуваннях.

© Ю.В. Голтвянський, О.Й. Гудименко, О.В. Дубіковський, О.І. Любченко,
О.С. Оберемок, Т.М. Сабов, С.В. Сапон, К.І. Чуніхіна, 2017

При створенні фотодіодів однією з важливих фізико-технологічних проблем є отримання досконалої межі поділу InSb–діелектрик з мінімальною густиною фіксованого заряду і поверхневих станів.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Нами було виготовлено два типи фотодіодів на підкладках антимоніду індію орієнтації $\langle 111 \rangle$ з робочою стороною А *n*-типу, легованих телуром до концентрації $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$:

1-й тип фотодіодів виготовлявся з використанням планарної технології,

2-й тип фотодіодів – шляхом формування мезаструктур.

Перед формуванням областей *p*-типу провідності у пластинах InSb на них методом термічного розпилення формували технологічну плівку SiO_x товщиною 150 нм при тиску в камері 10^{-5} Па та температурі підкладки 70°C .

У планарній технології локальні області *p*-типу провідності створювались імплантацією іонів Be^+ після формування фоторезистивної маски, що закривала області кристала фотодіода, які повинні залишатися *n*-типом. Використання іонів берилію дозволяє зменшити кількість дефектів у кристалічній ґратці InSb порівняно з іонами Mg та Cd. Крім того, атоми берилію вже при імплантації можуть розташовуватися у вузлах кристалічної ґратки, заміщуючи атоми In та стаючи електрично активними.

Імплантація іонів Be^+ проводилась у двох варіантах:

- одностадійна імплантація – 100 кеВ та доза $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$;

- двостадійна імплантація – спочатку з енергією 45 кеВ та дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, потім відповідно 120 кеВ та $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

У мезатехнології після легування берилієм всієї поверхні пластини без фоторезистивної маски локальні області фотодіода *p*-типу провідності видалялись у процесі фотолітографії, після чого витравлювалися незахищені фоторезистивною маскою технологічні плівки SiO_x травильним реагентом BOE, InSb травильним розчином складу $\text{HF}:(\text{COOH})_2:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ на глибину 0,7...0,9 мкм та самосуміщенням по фоторезистивній масці проводилось додаткове легування областей *n*-типу провідності іонами сірки (S^+) з енергією 100 кеВ та дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, що відповідає об'ємній концентрації домішки $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (*n*⁺-тип). Після видалення фоторезистивної маски та технологічної плівки SiO_x проводили двостадійний фотонний відпал легованих пластин у режимі $280^\circ\text{C} - 120 \text{ с}$, $380^\circ\text{C} - 20 \text{ с}$ у суміші аргону та водню. Далі формували анодний оксид товщиною 100–120 нм в електроліті складу $70\%(\text{CH}_3)_2\text{NCH} + 0,5\%(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8 + 0,01\%(\text{NH}_4)\text{F} + 24,49\%\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$. Після цього у планарній технології методом термічного розпилення створювали пасивуючу плівку SiO_x товщиною 800 нм при тиску в камері 10^{-5} Па та температурі підкладки 70°C , а в мезатехнології анодний оксид видаляли у розчині соляної кислоти, проводили хімічне пасивування поверхні в киплячому 1М розчині Na_2S та методом PECVD формували захисне покриття SiON товщиною 400 нм при температурі 300°C . Далі за допомогою процесу фотолітографії розкривали контактні вікна до активних областей *p*- та *n*(*n*⁺)-типів провідності підкладки InSb; після осадження плівок Cr+Au формували металізовану контактну розводку фотодіода.

На рис. 1 наведено схематичне зображення конструкції фотодіодів, виготовлених за планарною технологією, а на рис. 2 – з мезаструктурою.

При травленні мезаструктур важливим є вибір травильного реагента, який забезпечує оптимальну швидкість травлення і дзеркальну поверхню. Також необхідно контролювати кут нахилу на межі мезаструктури, який впливає на геометричні фактори самосуміщених областей *p*- та *n*⁺-типів провідності по межі мезаструктури. Нами було проведено дослідження режимів для різних травильних агентів. Результати наведено в табл. 1.

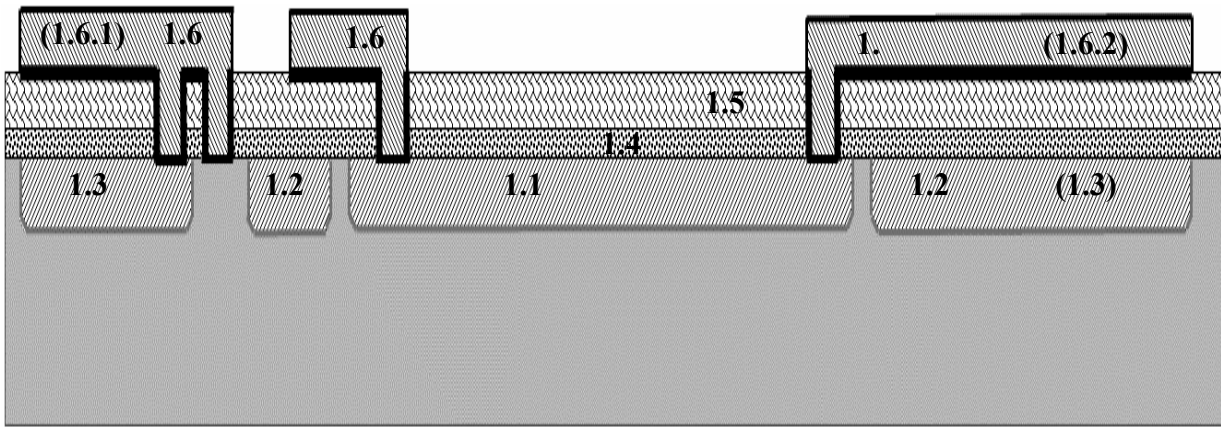


Рис. 1. Поперечний переріз планарного фотодіода. 1.1 – область анода фотодіода, 1.2 – область запобіжного кільця фотодіода, 1 – пасивні області фотодіода під контактними площадками, на яких проводиться зварювання виводів фотодіода, 1.4 – анодний оксид; 1.5 – пасивуюча просвітлювальна плівка, 1.6 – металева розводка фотодіода, 1.6.1 – контактна площадка для приварювання катодного контакту фотодіода, 1.6.2 – контактна площадка для приварювання анодного контакту фотодіода.

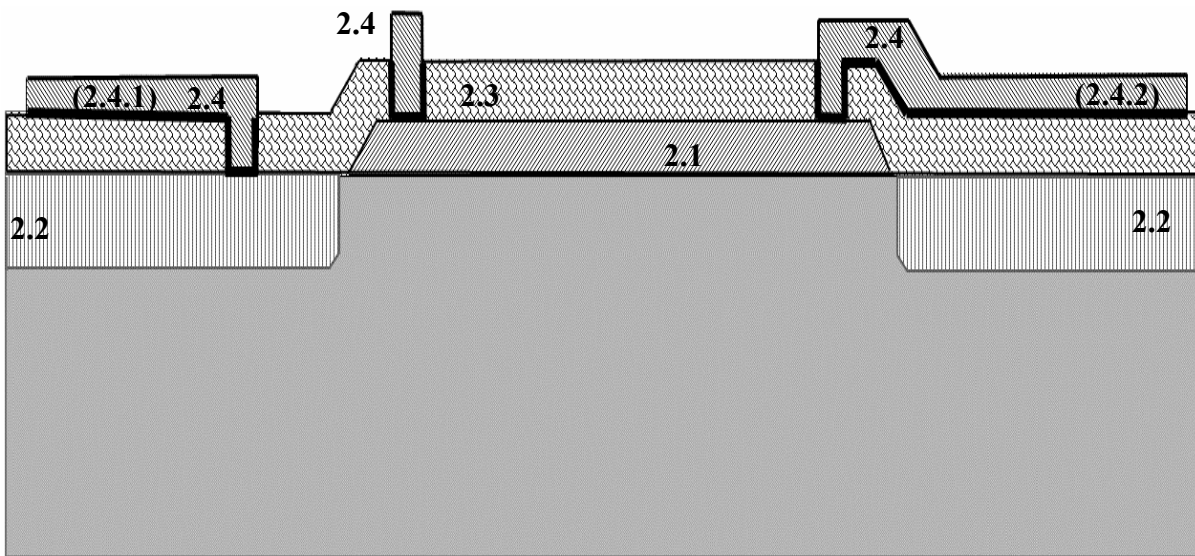


Рис. 2. Поперечний переріз фотодіода з мезаструктурою. 2.1 – область анода фотодіода, 2.2 – самосуміщені області n^+ -типу провідності, леговані сіркою, 2.3 – пасивуюча просвітлювальна плівка, 2.4 – металева розводка фотодіода, 2.4.1 – контактна площадка для приварювання катодного контакту фотодіода, 2.4.2 – контактна площадка для приварювання анодного контакту фотодіода.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця властивостей типових травильних розчинів для антимоніду індію.

Травильний розчин	Швидкість травлення, мкм/хв	Клин травлення, α°	Якість поверхні після травлення
$70\% \text{HNO}_3 : 49\% \text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 5:3:3$	34,5	27	матова
$70\% \text{HNO}_3 : 40\% \text{HOOCCH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{COOH} = 1:3$	2,7	30	дзеркальна
$70\% \text{HNO}_3 : 65\% \text{HCl} = 1:1$	48	45	матова
$30\% (\text{HOOCCH}_2)_2\text{C}(\text{OH})\text{COOH} : 30\% \text{H}_2\text{O}_2 : 70\% \text{HNO}_3 : 30\% (\text{NH}_4)\text{F} = 24:5:2:1$	0,13	32	дзеркальна
$48\% \text{HF} : 4\% \text{HOOC-COOH} : 76\% \text{H}_2\text{SO}_4 : 30\% \text{H}_2\text{O}_2 = 20:8:20:1$	1,8	60	дзеркальна

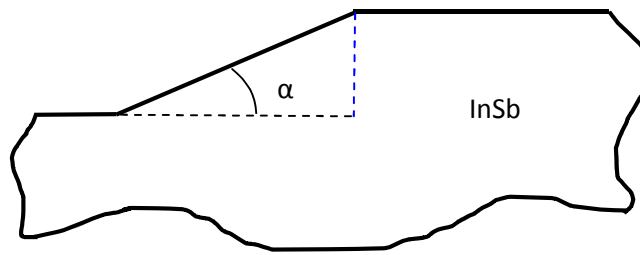


Рис. 3. Схематичне зображення профілю травлення мезаструктури, де α – кут нахилу при травленні (клин травлення).

Профілі розподілу Be в InSb досліджували методами мас-спектрометрії вторинних іонів (ВІМС) та вторинних нейтралів (МСВН) за допомогою приладів Atomika-4000 та INA-3 (Laybold, Germany) відповідно.

У ВІМС методі розпилення поверхні зразків первинним іонним пучком проводилося в режимі прямокутного растра 200×200 мкм під кутом падіння 45° . Реєстрація вторинних іонів відбувалася з центральної частини області розпилення з площі, яка становила 20% від площі растра. Енергія та струм пучка первинних іонів O_2^+ дорівнювали 5 кеВ та 0,1 мкА відповідно. У МСВН методі пучок первинних іонів Ar^+ формувався внаслідок прикладання високочастотної від'ємної електричної напруги між «стілкою» високочастотної (27 МГц) плазми низького тиску ($3,26 \cdot 10^{-3}$ мбар) та досліджуваним зразком. Величина такого іонного струму дорівнювала 0,4 мА. Енергія іонів – 500 еВ. Діаметр області розпилення – 3 мм.

Глибина кратера визначалася за допомогою контактного профілометра Dektak 3030 (Veeco Instruments, USA). Точність визначення становила 5-6% від глибини кратера.

Деформаційний стан приповерхневої області системи SiO_2 –InSb (до 10 мкм) при імплантації досліджували за допомогою високороздільного дифрактометра PANalytical X'Pert PRO на $CuK\alpha 1$ випромінюванні (довжина хвилі $\lambda = 0,15405980$ нм). Прописувались криві дифракційного відбиття як паралельно дифракційному вектору (ω - 2θ -сканування), так і перпендикулярно до нього (ω -сканування) для рефлексів (111) та (333). Використання чотирикратного Ge(220) монохроматора та двократного Ge (220) аналізатора дозволило отримати ці дифрактограми з високою роздільною здатністю. Стан захисного шару SiO_2 контролювався за допомогою рентгенівської рефлектометрії.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) та фотовідгук на джерело світла (розжареного до температури $530^\circ C$ ніхромового дроту на відстані 0,1 м від поверхні діода) сформованих фотодіодів вимірювали при $T = 77$ К. Під'єднання до контактних площадок забезпечувалось спеціально розробленою зондовою установкою, а реєстрація даних – приладом для вимірювання напівпровідникових приладів Л2-56.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

На рис. 4 представлено МСВН профілі розподілу домішок Be, O, Si, In, Sb у SiO_2 –InSb структурі. Видно, що характерний профіль розподілу берилію знаходиться поблизу межі поділу SiO_2 –InSb. Однак недостатня чутливість методики не дозволила прописати більш якісні профілі розподілу берилію.

На рис. 5 наведено ВІМС профілі розподілу іонів берилію, кремнію та індію в структурах SiO_2 –InSb. Максимум концентрації берилію спостерігається на глибині 350 нм. Разом з тим поблизу межі поділу SiO_2 –InSb є область товщиною 50–80 нм з низькою концентрацією берилію, що у подальшому може вплинути на якість контактної опору та струми витоку фотодіода при зворотному зміщенні. У зв'язку з цим проводили імплантацію берилію з двома значеннями енергії. На рис. 6 наведено розраховані (а) та експериментальні (б) профілі розподілу берилію в антимоніді індію. Характерним для цих профілів є наявність

двох максимумів концентрації берилію. Один – поблизу межі поділу $\text{SiO}_2\text{-InSb}$, який відповідає середньоквадратичному пробігу іонів для енергії 45 кеВ, а другий – для енергії 120 кеВ. Концентрація берилію більша за 10^{16} см^{-3} має місце на глибині близько 800 нм.

На рис. 7 показано дані з дослідження пластин InSb, імплантованих іонами ${}^9\text{Be}^+$ ($D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E = 45 \text{ кеВ}$ + $D = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E = 120 \text{ кеВ}$). Слід зазначити, що криві дифракційного відбиття $\omega\text{-}2\theta$ -сканування паралельно дифракційному вектору вихідного та імплантованого зразків містять досить значні «хвости» дифузного розсіяння (рис. 7). Це свідчить про наявність у вихідному та імплантованому зразках локальних деформаційних полів різних знаків. Вони можуть бути зумовлені наявністю захисного SiO_2 шару, який може вносити ці напруження. Після імплантації Be крива 2 (рис. 7) містить осциляції, які спричинені виникненням деформованого шару з відносно чіткою межею. За допомогою методики, описаної в роботі [1], було проведено моделювання дифрактограм рефлексів (111) та (333) та знайдено деформаційний профіль шару, який утворився при імплантації (рис. 8). При відпалі зникають як деформаційні «плечі», так і знижується рівень дифузного розсіяння (крива 3 на рис. 7). Це вказує на те, що відбувається релаксація напружень, які виникли як при нанесенні захисного шару SiO_2 , так і при імплантації Be після відпалу.

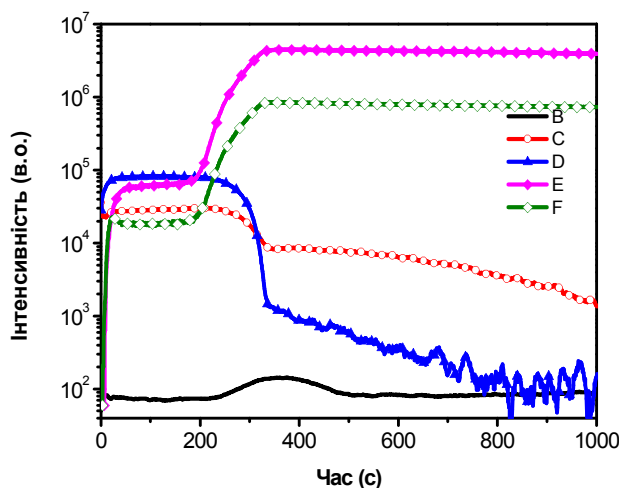


Рис. 4. МСВН профіль розподілу домішки Be в SiO_2/InSb структурі після імплантації з енергією 100 кеВ, дозою $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ та відпалу.

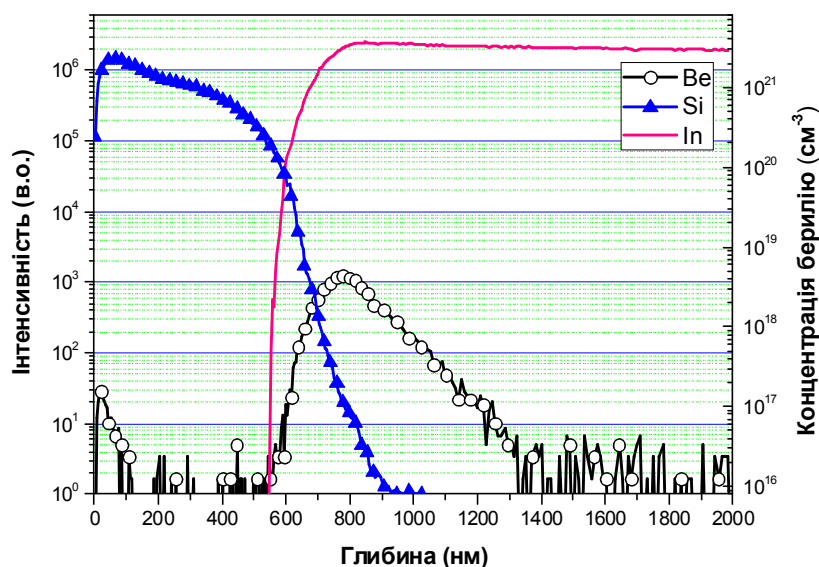
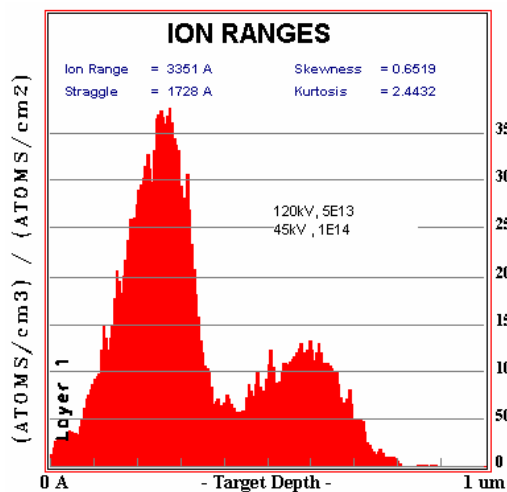
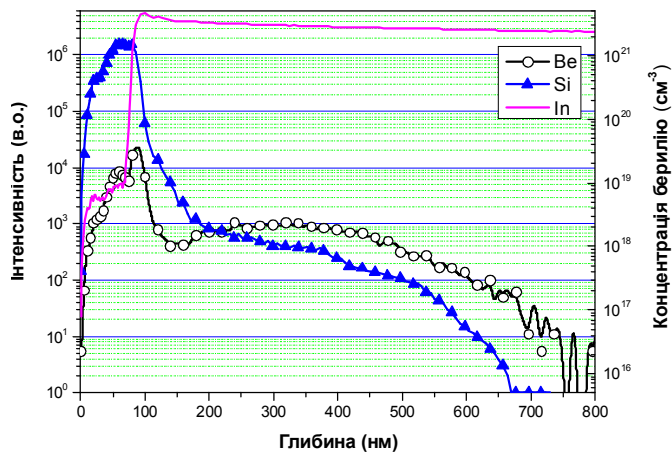


Рис. 5. ВІМС профілі розподілу іонів берилію, імплантованих в InSb з енергією 100 кеВ та дозою $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.



а



б

Рис. 6. Профілі розподілу іонів берилію, імпантованих в InSb з енергіями 45 кеВ (доза $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) + 120 кеВ (доза $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$): (а) – теорія, (б) – експеримент [13].

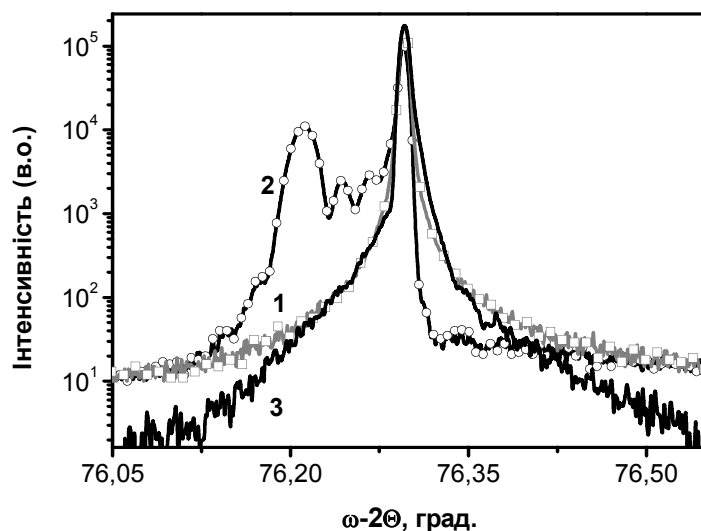


Рис. 7. ω - 2θ дифрактограма рефлексу (333) (1 – до імпантациї, 2 – після імпантациї, 3 – після відпалу).

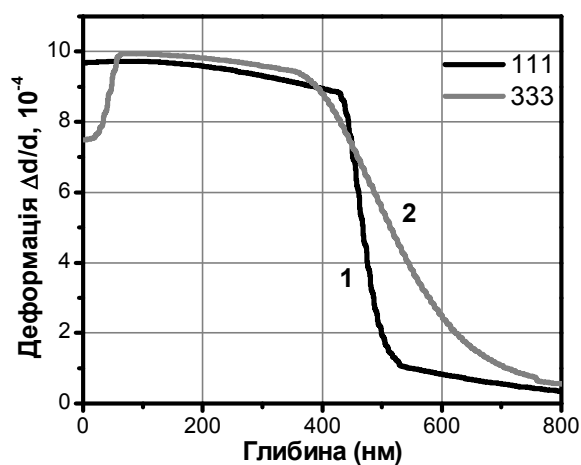


Рис. 8. Деформаційні профілі для зразка №1 (1 – моделювання за дифрактограмою рефлексу (111), 2 – рефлексу (333)).

Після травлення у травильному розчині на основі лимонної кислоти 30% $(\text{HOOCCH}_2)_2\text{C}(\text{OH})\text{COOH}$:30% H_2O_2 :70% HNO_3 :30% $(\text{NH}_4)\text{F}$ = 24:5:2:1 з різними режимами мезаструктуру досліджували за допомогою атомно-силового мікроскопа Dimension 3000 NanoScope IIIa.

На рис. 9 показано профіль травлення та рельєф поверхні InSb після формування мезаструктури. Видно, що застосування попереднього травлення в 1% розчині HF призводить до погіршення рельєфу травленої поверхні. Вигляд фотодіода після травлення мезаструктури зображено на рис. 10.

Результати дослідження сформованої мезаструктури методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії представлено на рис. 11. Показано, що виявлені забруднення є поверхневими. Чип фотодіода після розділення пластини на кристали показано на рис. 12. Вольт-амперні характеристики планарного та мезадіодів наведено на рис. 13. При виготовленні планарного фотодіода ми використовували імплантацію берилію з одним значенням енергії, тоді як для мезаструктур – з двома значеннями енергії. Видно, що зворотні струми для планарного діода є значно більшими. Обидва фотодіоди мають фоточутливість в ІЧ області спектра. Більшу чутливість і значно менші темнові струми мають діоди, виготовлені за мезатехнологією. Кількісні характеристики фоточутливості та інших параметрів фотодіодів ми не наводимо в даній роботі.

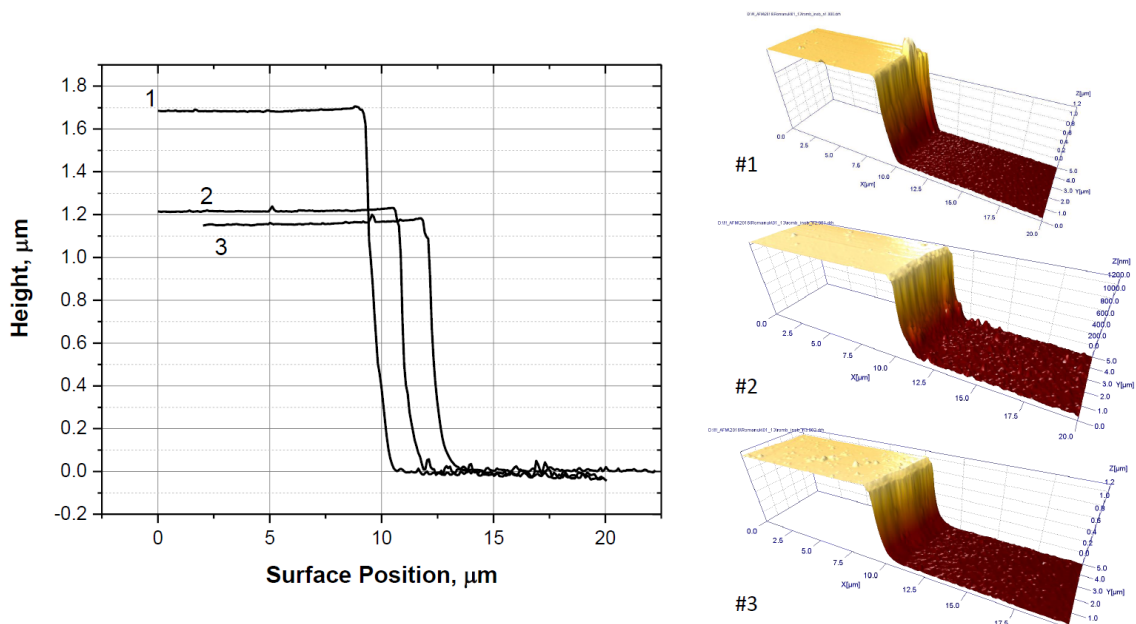


Рис. 9. Сходінка при травленні мезаструктури в різних режимах: 1 – час травлення 37 хв, 2 – травлення в 1% HF 2 хв, відмивання у деіонізованій воді та травлення 29 хв, 3 – час травлення 29 хв.

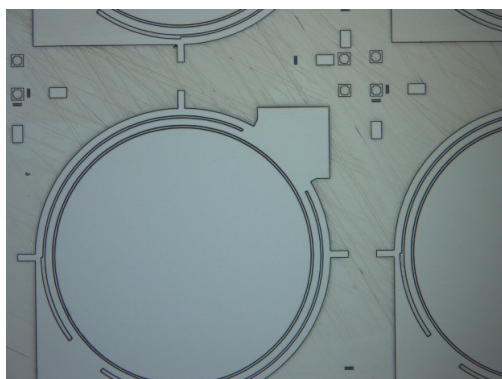


Рис. 10. Зовнішній вид кристала фотодіода після травлення мезаструктури.

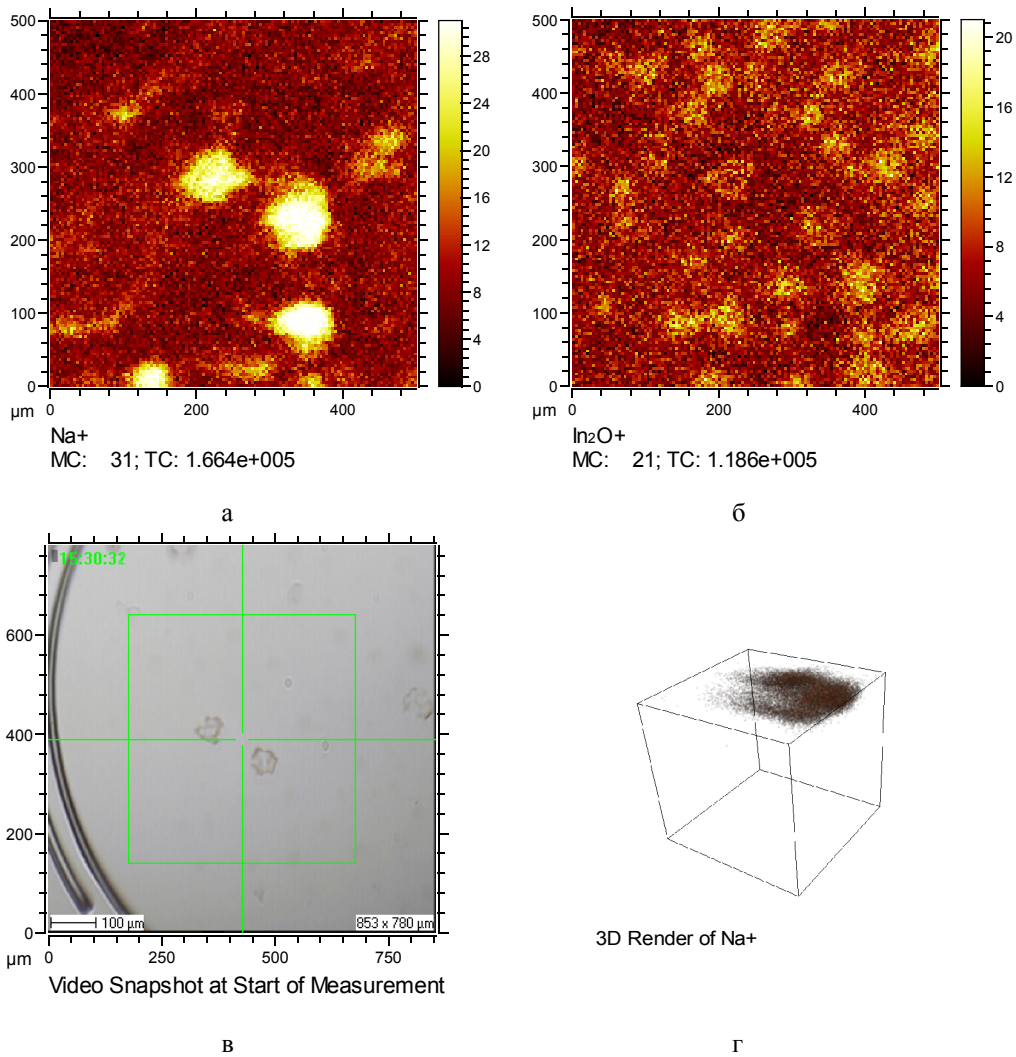


Рис. 11. Зображення, отримані методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, поверхневих забруднень пластини InSb після травлення мезаструктури і відмивання (а, б, в). (а) Великі плями відповідають накопиченню натрію, (б) дрібні плями – острівці оксиду індію, (в) 3D розподіл натрію у пластині InSb, (г) оптична мікрофотографія досліджуваних областей.

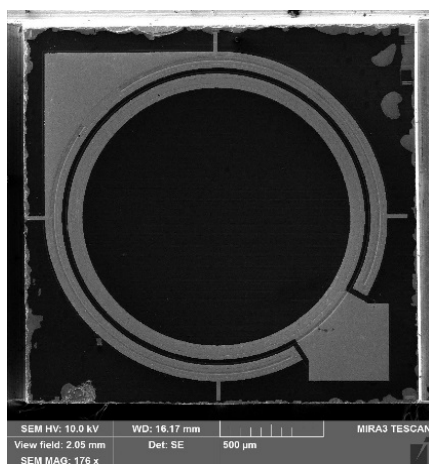


Рис. 12. Зовнішній вигляд чипа фотодіода після розділення пластини InSb на кристали, отриманий методом растрової електронної мікроскопії.

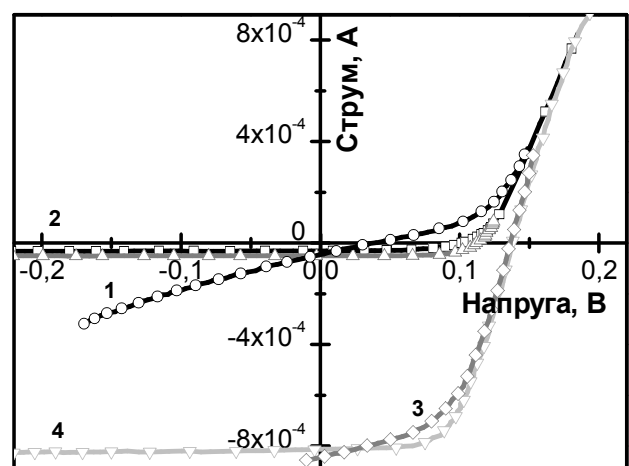


Рис. 13. Вольт-амперні характеристики планарного (1) та меза- (2) діодів без освітлення та з ІЧ-освітленням (3, 4) при $T = 77$ К.

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Використання двох мас-спектрометричних методів пов'язано з низкою переваг одного над другим. Так, ВІМС має високу чутливість, великий динамічний діапазон та роздільну здатність за глибиною. Проте іонізація аналізованої домішки визначається оточенням вибитого іона в матриці, що може суттєво вплинути на результати аналізу (так званий ефект матриці). У той же час перевагою МСВН є відсутність впливу ефектів матриці. Це забезпечується сепарацією у просторі процесів зародження та іонізації вибитих частинок. Крім того, використання менших значень енергії розпилення дозволяє зменшити ефект перемішування атомів в атомних шарах. Імовірність іонізації елементів у МСВН методі майже однакова для всіх елементів періодичної таблиці і становить приблизно 10^{-2} . Однак МСВН має меншу чутливість, чим і програє ВІМС. Для проведення об'єктивного аналізу було використано обидві методики. Слід відмітити, що при імплантації ${}^9\text{Be}$ з використанням джерел з низьким іонним струмом існує можливість додаткової імплантації тричі іонізованого алюмінію (з оснастки).

Під час технологічних обробок при виготовленні фотодіода на основі антимоніду індію відбувається, з одного боку, забруднення його поверхні, що спричиняє необхідність застосування анодного окиснення для формування більш якісної межі поділу InSb–діелектрик або очистки поверхні безпосередньо перед формуванням діелектрика, з іншого боку, при застосуванні в структурі фотодіода анодного оксиду часто спостерігається відшаровування захисного покриття. Цього вдається уникнути за рахунок збільшення температури осадження захисних покриттів вищої за $250\text{ }^\circ\text{C}$, при якій відбувається ефективна десорбція вологи з поверхні. Експлуатаційні властивості фотодіода покращуються при використанні плазмохімічного осадження пасивуючої плівки SiN з парогазової суміші $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 + \text{N}_2$ (Ar) чи SiON з парогазової суміші SiH_4 [$\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$] + $\text{NH}_3 + \text{O}_2$ (N_2O) при температурах у діапазоні $250\text{...}300\text{ }^\circ\text{C}$.

Для формування *p-n* переходів у монокристалах антимоніду індію оптимальним є використання імплантації іонів берилію з двома значеннями енергії. При більшій енергії доза імплантації є значно меншою і забезпечує достатню концентрацію акцепторів для формування *p*-області і меншу концентрацію дефектів в області просторового заряду. При використанні одного значення енергії поблизу поверхні формується шар з малою концентрацією легуючої домішки (рис. 5), що впливає на якість контактів і може бути причиною збільшення зворотних струмів, як це ми бачимо у планарному діоді. Дослідження профілів розподілу берилію різними методами дозволило визначити концентрацію домішки і знайти оптимальні режими імплантації. Профілі розподілу берилію збігаються з теоретичними розрахунками.

5. ВИСНОВКИ

Характерними забрудненнями, які попадають на поверхню InSb при технологічних операціях і впливають на параметри фотодіодів, є накопичення натрію та острівці оксиду індію.

Показано, що оптимальними режимами імплантації берилію в InSb для формування *p*-області є двостадійна імплантація іонів $D = 1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, $E = 45\text{ кеВ}$ + $D = 2 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$, $E = 120\text{ кеВ}$, що дозволяє отримати достатню концентрацію акцепторів за малої концентрації радіаційних дефектів.

До зменшення контактного опору і покращення адгезії металу приводить додаткове легування областей *n*-типу провідності іонами сірки (S^+).

Для отримання високої фоточутливості в ІЧ області спектра і зменшення шумів більш перспективним є використання мезаструктур для формування фотодіодів.

**Yu.V. Goltvyanskyi, O. J. Gudymenko, O.V. Dubikovskiy, O.I. Liubchenko,
O.S. Oberemok, T.M. Sabov, S.V. Sapon, K.I. Chunikhina**

**INVESTIGATION OF PHOTODIODE FORMATION PROCESSES IN InSb BY
USING BERYLLIUM ION IMPLANTATION**

The processes of photodiode structure formation in indium antimonide single crystals have been described. Two variants of the photodiode structures have been considered, namely: planar diode and mesastructure. It has been shown that the chosen technological parameters (dose of beryllium implantation, energy of implantation, annealing modes) provide formation of structures sensitive to infrared radiation. The proposed mesastructure technology has the following advantages: the reverse current for the planar diode is much larger, the diodes with mesastructure have higher sensitivity and much lower dark current value.

Keywords: photodetector, InSb, mesastructure, ion implantation, SIMS.

1. Kladko V.P., Gudymenko O.Yo. Modelling of X-Ray rocking curve for layers after two-stage ion-implantation. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2017. **20**, No 3. P. 355–361.
2. Downs C., Vandervelde T.E. Progress in infrared photodetectors since 2000. *Sensors*. 2013. **13**. P. 5054–5098.
3. Hurwitz C.E. and Donnelly I.P. Planar InSb photodiodes fabricated by Be and Mg ion implantation. *Solid-State Electron*. 1975. **18**, No. 9. P. 753–756.
4. Патент на корисну модель № 115173, Україна, МПК H01L 31/18, H01L 21/265 (2006.01). Спосіб виготовлення фотодіода на антимоніди індію. Романюк Б.М., Сапон С.В., Гудименко О.Й., Попов В.Г., Мусаєв С.М., Калистий Г.В., Педченко Ю.М., Дубіковський О.В. Заявка № u2016 09206, 02.09.2016. Опубл. 10.04.2017. Бюл. №7.
5. Сукач А.В., Тетьоркін В.В., Матіюк І.М., Ткачук А.І. InSb Фотодіоди (Огляд. Частина I). *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2016. Вып. 51. С. 43–68.
6. Сукач А.В., Тетьоркін В.В., Матіюк І.М., Ткачук А.І. InSb Фотодіоди (Огляд. Частина II). *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2016. Вып. 51. С. 69–90.
7. Патент на корисну модель № 115174, Україна, H01L 31/18, H01L 21/265 (2006.01). Спосіб виготовлення фотодіодів на антимоніди індію. Кладько В.П., Голтвянський Ю.В., Романюк А.Б., Мельник В.П., Оберемок О.С., Федулов В.В., Сабов Т.М., Сафрук Н.В. Заявка № u2016 09207, 02.09.2016. Опубл. 10.04.2017. Бюл. №7.
8. Declémy M.I.A.E.-A.A., Sauvage T., Kotai E., Leveque P. Be- and Mg-ion implantation-induced damage in InSb. *Mater. Sci. in Semiconductor Process*. **4**. 2001. P. 277–279.
9. Патент РФ № 2461914, МПК H01L31/036 (2006.01). Планарний фотодіод на антимоніде індія. Астахов В.П., Астахова Г.С., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Михайлова Е.В. Заявка № 2011123854/28, 14.06.2011. Опубл. 20.09.2012.
10. Langan I.D., Vismanasan C.R. Characterization of improved InSb interface. *J. Vac. Sci. Technol.* 1979. **16**, No. 5. P. 1474–1477.
11. Kreutz E.W., Rickus E. and Sotnik N. The effect of temperature on the stoichiometry of InSb(110) surfaces. *Surf. Technol.* 1980. **11**. P. 171–177.
12. Liu J. Rapid thermal annealing characteristics of Be implanted into InSb. *Appl. Surf. Sci.* **126**. 1998. P. 231–234.
13. <http://www.srim.org/>

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: ober@isp.kiev.ua