

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва факультету / інституту)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка

(код і назва)

на тему: Фотодіод на основі InSb _____

Виконав: студент VI курсу, групи ДП-92мп

(шифр групи)

Кульбачинський Олександр Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., Іващук Анатолій Васильович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Свечніков Георгій Сергійович

(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

(підпис)

Рецензент зав. каф. ЕІ, професор, д.т.н.. Тимофеев В.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань. Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 102 сторінках, вона містить 5 розділів, 40 ілюстрацій, 27 таблиць та 25 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження став фотодіод на основі InSb утворений імплантацією іонів берилію.

Предмет роботи – профіль розподілу імплантованої домішки та утворених паразитних власних оксидів, вольт-амперні характеристики фотодіода.

Метою даної роботи є удосконалення технологічного маршруту для виготовлення фотодіода на основі n-InSb, який працює при 77 К, та удосконалення його параметрів.

Проведено огляд науково-технічної літератури по заданій тематиці, коротко надано відомості про сенсори на основі InSb, матеріали з аналогічними властивостями, перспективність розробки. Викладена інформація про фізико-технологічні аспекти основних процесів технологічного маршруту з використанням іонної імплантації та швидкого термічного відпалу. Проаналізовано фотодіоди стороннього виготовлення. Проведено моделювання властивостей пристрою внаслідок зміни технологічних параметрів. Досліджено вплив анодного окислу на структуру матеріалу. Описано конструкцію та удосконалений технологічний маршрут виготовлення фотодіода. Викладені результати досліджень профілів розподілу та ВАХ.

ABSTRACT

The work is presented on 101 pages, it contains 5 sections, 40 illustrations, 27 tables and 25 sources in the list of references.

The object of the study was an InSb-based photodiode formed by implantation of beryllium ions.

The subject of the work is the distribution profile of the implanted impurity and the formed parasitic intrinsic oxides, volt-ampere characteristics of the photodiode.

The purpose of this work is to improve the technological route for the manufacture of a photodiode based on n-InSb, which operates at 77 K, and to improve its parameters.

A review of scientific and technical literature on a given topic, briefly provided information about sensors based on InSb, materials with similar properties, the prospects of development. Information on physical and technological aspects of the main processes of the technological route using ion implantation and rapid thermal annealing is presented. Foreign photodiodes are analyzed. The modeling of the device properties due to the change of technological parameters is carried out. The influence of anodic oxide on the structure of the material is investigated. The design and improved technological route of photodiode manufacturing are described. The results of research of distribution profiles and I – V characteristics are presented.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.	7
1.ІНФРАЧЕРВОНІ ФОТОДЕТЕКТОРИ	8
1.1 Область застосування ІЧ випромінювання та огляд характеристик ІЧ випромінювання.....	8
1.2.Фотодіоди для середнього ІЧ діапазону.....	11
1.3.Теплове випромінювання.....	16
2.ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ НА ОСНОВІ InSb.....	19
2.1. Іонна імплантація.....	19
2.1.1. Особливості та установка для методу іонної імплантації.....	19
2.1.2. Вплив іонної імплантації Be та Mg на структурні властивості опроміненої області	22
2.2. Швидкий термічний відпал.....	24
2.3. Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС).....	27
2.4. Обробка поверхні.....	29
2.4.1. Абразивна обробка поверхні підкладок	29
2.4.2. Хіміко-динамічне полірування.....	34
2.5. Методи моделювання параметрів.....	36
2.5.1. Моделювання в SRIM.....	36
2.5.2. Моделювання в Lumerical FDTD.....	38
3. АНАЛІЗ СТОРОННІХ ФОТОДІОДІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	48
3.1. Аналіз фотодіодів стороннього виготовлення.....	49
3.2. Моделювання параметрів виготовлення.....	55
3.2.1. Моделювання профілів розподілу домішки.....	55
3.2.2. Моделювання в Lumerical.....	57

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ, РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ	60
4.1. РФЕС (XPS) дослідження.....	60
4.2. Дослідження методом ВІМС	62
4.2.1. Дослідження профілів розподілу берилію імплантованого в InSb.....	62
4.2.2. Дослідження впливу АО та пасивуючих покриттів.....	63
4.3.Опис конструкції фотодіода.....	67
4.4.Технологічний маршрут виготовлення фотодіода.....	71
4.5.Дослідження ВАХ отриманих фотодіодів.....	78
5.РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	81
5.1 Опис ідеї проекту.....	81
5.2.Технологічний аудит ідеї проекту.....	83
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	84
5.4. Розробка ринкової стратегії проекту.....	91
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ФЕП – фотоелектричний перетворювач

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

ОПЗ – область просторового заряду

ХМП – хіміко-механічне полірування

ХДП – хіміко-динамічне полірування

ДІ – деіонізований

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ННЗ – неосновні носії заряду

ОНЗ – основні носії заряду

РЕСVD – плазмо-хімічне осадження з газової фази

РТА – швидкий термічний відпал

ВІМС – мас-спектрометрія вторинних іонів

РФЕС – рентгенівської фотоелектронної спектроскопії

АО – анодний окисел

ПЗ – програмне забезпечення

ІЧ – інфрачервоне випромінювання

ВСТУП

В даній роботі розглядається фотоприймач на фотоефекті, а саме фотодіод на антимоніді індію. Антимонід індію має високу квантову ефективність - близько 80-90%. Їх суттєвими перевагами у порівнянні із фотодіодами на основі сполуки $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0.3$) є більш висока стабільність, технологічність виготовлення, а також висока структурна досконалість монокристалічного матеріалу [1]. InAs подібний InSb, але має велику ширину забороненої зони. тому на основі цього матеріалу були виготовлені фотовольтаїчні і фотопровідні детектори з граничною довжиною хвилі 3-4 мкм. Недоліком InSb є висока нестабільність: характеристики детектора, як правило, дрейфують у часі. Через ці нестійкості, детектори рідко використовуються в метрології. Через вузькість забороненої зони, детектори, в яких, в якості напівпровідникового матеріалу застосовується антимонід індію, вимагають глибоке охолодження, так як вони можуть працювати тільки при криогенних температурах (77 К).

Наприкінці 50-х років ПЧ-датчики на основі антимоніду індію набули популярності у військовій промисловості, р-n переходи в InSb формували за допомогою дифузії атомів Zn та Cd в підкладку n-типу. Згодом було виявлено, що ці матеріали утворюють пористу структуру, яку складно видалити. З розвитком технології іонної імплантації вона почала домінувати, особливо у технологіях виготовлення багатоелементних лінійок. Для вирішення цієї пористої структури почали використовувати імплантацію іонів Mg та Be. Через більшу атомну масу магній створює більшу кількість радіаційних дефектів, що впливає на кінцеву ВАХ детектора. Be є відносно дорогим та високотоксичним елементом однак утворює кращу структуру.

1.ІНФРАЧЕРВОНІ ФОТОДЕТЕКТОРИ

1.1 Область застосування ІЧ випромінювання та огляд характеристик ІЧ випромінювання

Інфрачервоне детектування широко використовується як для військових, так і для цивільних цілей. Військові цілі включають фіксування об'єктів, спостереження, нічне бачення та відстеження перехоплювачів. Цивільні програми включають термографію, спектроскопію, прогнозування погоди та інфрачервону астрономію. Більшість згаданих цілей детектування вимагає ІЧ-передачі через повітря, оскільки ІЧ рухається від об'єкта до детектора в повітрі. ІЧ-випромінювання послаблюється процесом розсіювання та поглинання молекулами газів. Променевий потік нагрітого предмета поглинається газами, що входять до складу атмосфери. Водяна пара, вуглекислий газ та озон є найбільш домінуючими поглиначами. ІЧ-випромінювання в декількох областях від 1 до 3 мкм та 6,3 мкм поглинається водяною парою. Сильне поглинання в районі 2,6, 4,3 та 15 мкм в основному відбувається за рахунок вуглекислого газу.

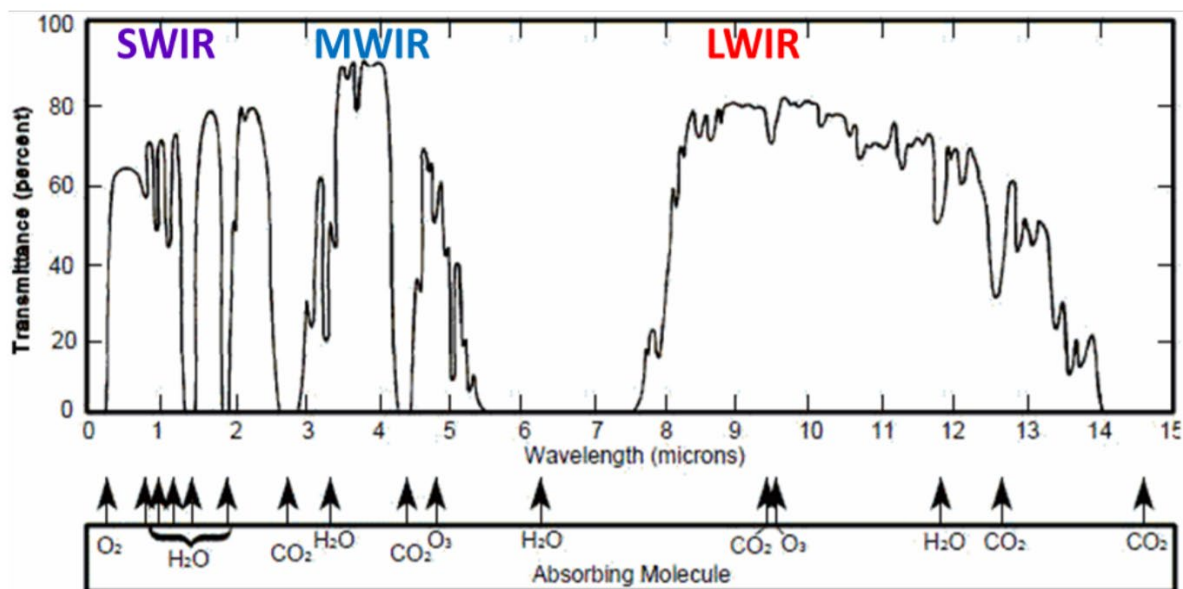


Рисунок – 1.1. Атмосферний коефіцієнт пропускання електромагнітного випромінювання від довжини хвилі [2]

Широке використання фотоприймачів обумовлено сенсоризацією виробничої діяльності, тобто заміна органів чуття людини на сенсори. Потреба у вимірювальних приладах стрімко росте у зв'язку з швидким розвитком автоматизованих систем керування й контролю, впровадженням сучасних технологічних процесів, переходом до автоматизованих виробництв. В еру бурхливого розвитку оптоелектроніки вартість сенсорів швидко падає, що дозволяє їх використовувати в залежності від поставленої задачі для побудови широкого класу спеціалізованих оптико-електронних вимірювальних пристроїв і систем із високими технічними характеристиками.

Фотоприймачі – великий клас пристроїв, які фіксують електромагнітне випромінювання і перетворюють його у електричний сигнал. Основою фотоелектричного ефекту являється поглинання енергії фотона, яке супроводжується переходом носіїв заряду на більш високий енергетичний рівень. Для вимірювання енергетичних параметрів випромінювання більш широкого поширення набули фотодіоди. Спектральний діапазон чутливості фотодіода визначається шириною забороненої зони матеріалу та глибиною залягання домішкових рівнів. При роботі в видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах діоди зазвичай зміщуються в зворотному напрямку за допомогою порівняльно великої напруги, щоб зменшити час прольоту носіїв і знизити ємність переходу. Напруга зміщення, однак, не настільки велика, щоб викликати лавинний пробій. Цим обмеженням на величину зсуву відрізняються фотодіоди, які ми розглядаємо, від лавинних фотодіодів, в яких внутрішнє підсилення досягається саме за рахунок ударної іонізації в умовах лавинного пробію. У сімейство фотодіодів входять діоди з р – n переходом, р – і – n -діоди, діоди зі структурою метал – напівпровідник (з бар'єром Шотткі) і діоди з гетеропереходом.

Квантова ефективність представляє собою число фотогенерованих електронно-діркових пар, віднесене до числа падаючих фотонів:

$$\eta = \left(\frac{I_p}{q}\right) / \left(\frac{P_{opt}}{h\nu}\right) \quad (1.1)$$

де I_p - фотострум, зумовлений поглинанням падаючого оптичного випромінювання з потужністю P_{opt} і довжиною хвилі λ (яка відповідає енергії фотона $h\nu$). Порівняльним критерієм якості є чутливість, яка визначається як відношення фотоструму до оптичної потужності. Також одним з основних факторів, що визначають квантову ефективність, є коефіцієнт поглинання.

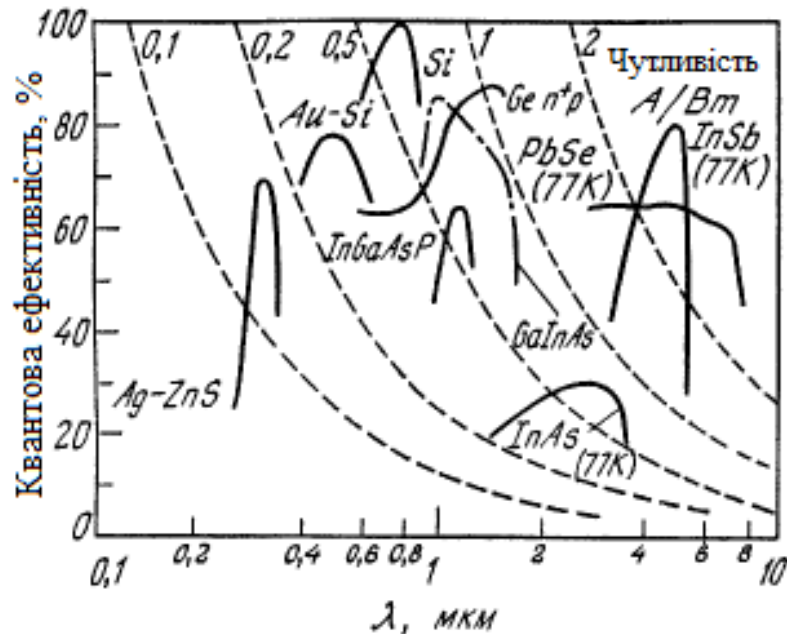


Рисунок – 1.2. Залежності квантової ефективності і чутливості (штрихова крива) різних фотодетекторів від довжини хвилі випромінювання[1]

Короткохвильова межа фотовідповіді обумовлена тим, що в області коротких хвиль випромінювання поглинається в близькості до поверхні, де час рекомбінації малий. Внаслідок цього фотоніє рекомбінують раніше, ніж йдуть з поверхневого шару. На Рис. 1.2. при наведені типові залежності квантової ефективності від довжини хвилі для деяких високочастотних фотодіодів і криві квантової ефективності, що відповідають заданим значенням чутливості. В ультрафіолетовій і видимих областях спектра високої квантової ефективністю володіють фотодіоди із структурою метал-напівпровідник. У близькому ІЧ-діапазоні (приблизно на довжинах хвиль $\sim 0,8-0,9$ мкм) у кремнієвих фотодетекторах з певним покриттям можна досягнути квантової ефективності 100%. В діапазоні довжин для хвиль 1,0-1,5 мкм висока квантова ефективність характерна фотодіодам із Ge, а також виготовлені на основі потрійних (GaInAs) і

четверних (GaInAsP) з'єднань хімічних елементів III і V груп. Для забезпечення стабільної високоефективної роботи в довгохвильовому діапазоні фотодіоди часто охолоджуються до доволі низьких температур (до 77 К).

Швидкість фотовідповіді обмежує три фактори: дифузія носіїв заряду, ємністю збідненого області і часом дрейфу через збіднену область. Носії заряду, згенеровані за межею збідненої області, повинні дифундувати до області переходу, що суттєво збільшує час затримки фотовідповіді. Задля зменшення впливу дифузії, необхідно утворити перехід біля поверхні. Більша частина випромінювання поглинається у випадку, коли збіднена область доволі широка; при високих зворотних зсувах дрейф носіїв заряду відбувається зі швидкістю насичення.

1.2. Фотодіоди для середнього ІЧ діапазону

Типовими компонентами системи інфрачервоної детектора складається з оптики для збору світла, ІЧ-пристрою, масиву фокальної площини для виявлення ІЧ-сигналу та перетворення його в електричний сигнал, системи охолодження для масиву фокальної площини, зчитуючої інтегральної схеми для збору електричного сигналу та виконання початкової, цифрової обробки сигналів та електронних пристроїв для цифрового відображення інфрачервоних зображень. Принципова схема ІЧ-системи наведена на рис. 1.3

ІЧ детектори можуть приймати ІЧ-випромінювання, що випромінюється від об'єктів з температурою вище 0 К. Оптика необхідна для фокусування ІЧ-випромінювання. Поглинаючи ІЧ-випромінювання з рівною або перевищуючою енергією ширини забороненої зони, детектори генерують електронно-діркову пару. Вони можуть подавати електричний сигнал, індукований в р-п-переході, який перетворюється в цифровий сигнал. Ми можемо спостерігати за об'єктами через пристрої відображення навіть у темному середовищі.

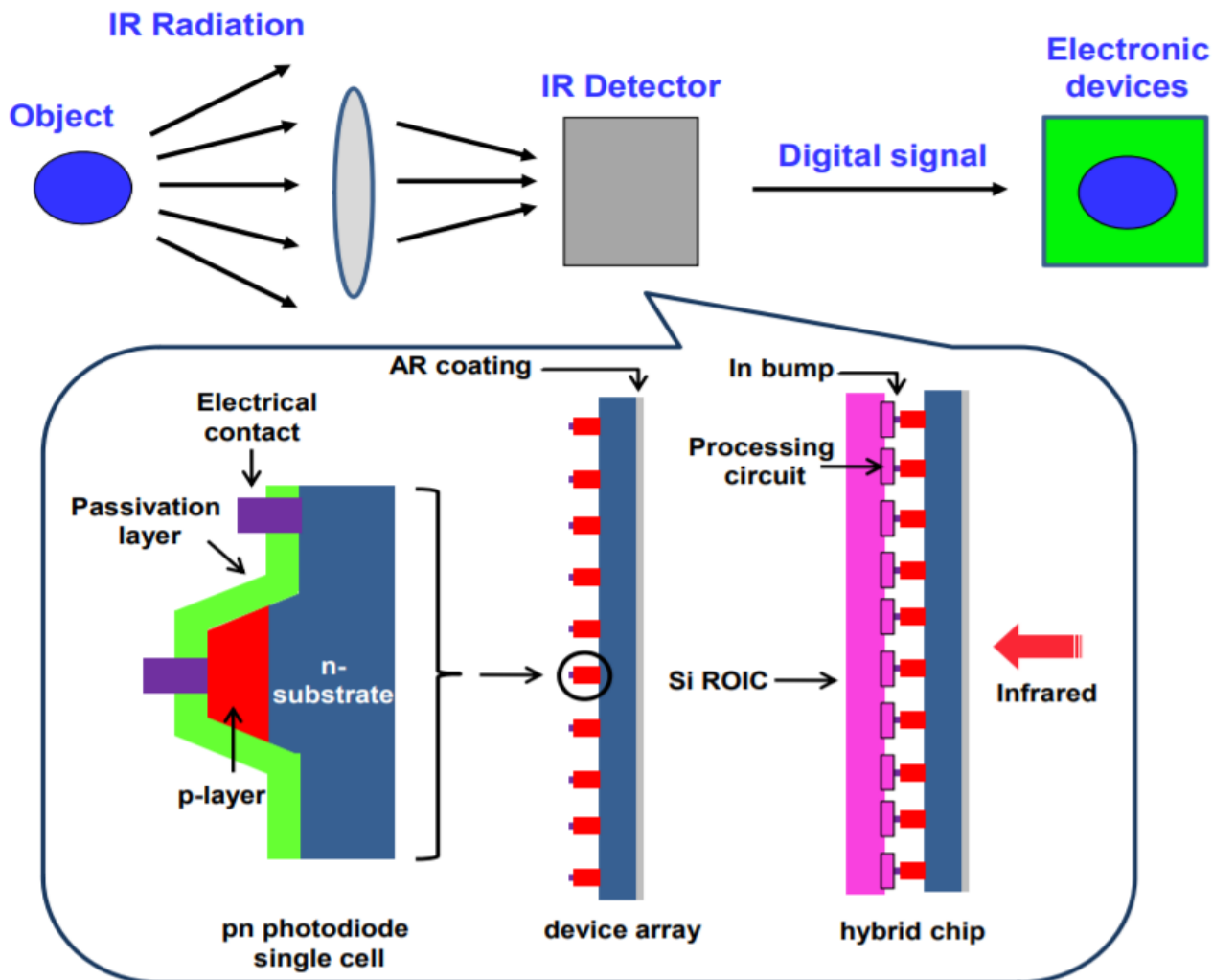


Рисунок – 1.3. Принципова схема ІЧ-фотодіодної системи, включаючи її компоненти [3]

Давайте розглянемо найпростіший опис системи, що використовує фотоелектричний ефект, тобто n-p-діод із зворотним зміщенням в темних умовах. Завдяки внутрішньому потенціалу, на стику між двома легованими областями надлишок дірок у валентній зоні p-області прагне компенсувати надлишок вільних електронів у зоні провідності n-області, створюючи струм дифузії вільних носіїв: електрони дифундують в область p-типу, а дірки - в область n-типу до стану рівноваги. Результатом цієї дифузії є утворення на стику області виснаження вільного носія з залишковими іонізованими атомами. Ця іонізація, у свою чергу, генерує електричний потенціал (і поле E), що діє проти подальшої дифузії через механізм дрейфуючого струму, згідно з яким будь-який вільний носій у збідненій

області зміщується у відповідну сторону. Зворотне зміщення діє як додаткова рушійна сила механізму дрейфу, посилюючи його щодо дифузії. Це призводить до збільшення потенціалу у області просторового заряду та ширини виснаженого регіону.

Якщо надати освітлення, то внутрішні процеси поглинання можуть відбуватися з утворенням електронно-діркових пар. Електрони, що генеруються в області р-типу, дифундують в цій області і тут частково рекомбінують з дірками, тоді як дірки, що генеруються в області n-типу дифундують в n-область і там частково рекомбінують з електронами. Натомість пари, що утворюються в збідненій області та за її межами, але на відстані від краю області виснаження, меншій за довжину дифузії, розділяються: завдяки електричному полю ці нові носії дрейфують у відповідні сторони, що призводить до невеликого збільшення зворотного струму - фотоструму - пропорційного інтенсивності випромінювання.

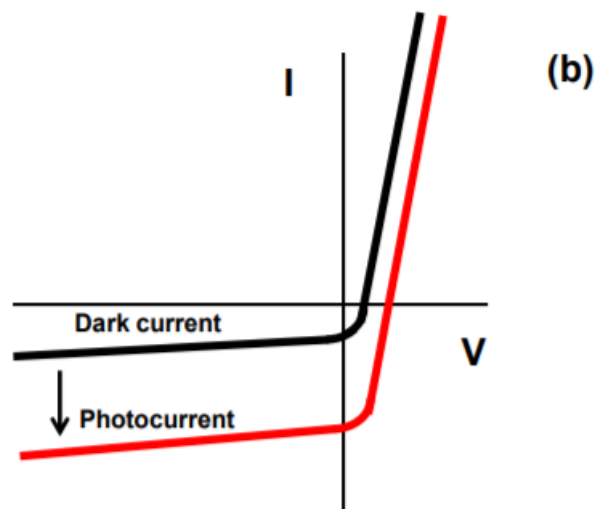


Рисунок – 1.4. ВАХ освітленого і не освітленого фотодіода [3].

Значення фотоструму прямо пропорційно освітленості та при сталому спектральному складі напівпровідник поглинає випромінювання (при фоторезистивному ефекті фотострум залежить ще і від напруги живлення):

$$I_{\phi} = \Phi_e S_{\text{інт}}, \quad (1.2)$$

де I_ϕ – фотострум, А; Φ_e - поглинена потужність випромінювання, Вт; S_{INT} - інтегральний (по спектру) коефіцієнт перетворення напівпровідника, А/ Вт.

У будь-якого напівпровідника є довгохвильова межа, що окреслює можливість реалізації внутрішнього фотоэффекту (червона межа), оскільки фотопровідність може виникнути, якщо енергія фотона $h\nu$ достатня, щоб надати електрону енергію для подолання забороненої зони $h\nu \geq E_g$. Червона межа спектральної чутливості напівпровідникових пристроїв на внутрішньому фотоэффекті дорівнює:

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{h\nu}{\Delta c} = \frac{1.241}{\Delta E_g} \text{ (мкм)}, \quad (1.3)$$

де $\lambda_{\text{гр}}$ - гранична довжина хвилі монохроматичної засвічення, при якій виникає внутрішній фотоэффект; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с - постійна Планка; $c = 3 \cdot 10^{14}$ мкм/с - швидкість світла; ΔE_g - ширина забороненої зони, виражена в еВ.

При ненульових температурах T червона межа внутрішнього фотоэффекту розмивається за рахунок теплового розкиду швидкостей електронів, що поглинають фотон, - переходи електронів з зв'язаного стану у вільний можуть відбуватися не тільки через поглинання фотонів $h\nu$, що зумовлює появу фотопровідності, а із-за поглинання фонів, що супроводжується появою темної провідності напівпровідника, а також із-за поглинання квантів іонізуючих випромінювань [3]. Але, якщо останній механізм в фотометрії досить екзотичний, то темнова провідність часом може конкурувати з фотопровідністю - це, власне, і відбувається поблизу червоної межі. Дійсно, сукупність темної σ_{th} і фото- σ_{ph} провідностей визначається як:

$$\sigma_{th} + \sigma_{ph} = e[\mu_n(n_0 + \Delta n) + \mu_p(p_0 + \Delta p)] \quad (1.4.)$$

де e - заряд електрона, μ_n і μ_p - рухливості електронів і дірок, n_0 і p_0 - концентрації термоіонізованих електронів і дірок, Δn і Δp - концентрації фотоіонізованих електронів і дірок. У той же самий час температурна залежність кожної провідності визначається як:

$$\sigma_{th,ph} = const \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (1.5.)$$

де $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж / К - постійна Больцмана; T – абсолютна температура, К. Зіставлення цих виразів показує температурне зростання питомої ваги темної компоненти в сигналі навіть при стаціонарній засвітці фотоприймача, тим більше при збільшенні довжини хвилі. Особливо відзначимо невластні напівпровідники, у багатьох з яких середня енергія теплових коливань решітки ($kT = 0,025$ еВ при кімнатній температурі) перевищує енергію активації відповідних рівнів. Отже, при $T = 20$ ° С домішкові атоми вже іонізовані термічно (якщо $\delta E_g = 0,25$ еВ, їх частка становить близько 1%), тобто темнова провідність такого напівпровідника аж ніяк не нульова.

Для того щоб підвищити швидкодію і чутливість фотодіодів застосовуються структури $p - i - n$ типу, широкий внутрішній шар забезпечує найбільшу ймовірність поглинання входять фотонів проте, він не повинен бути надто широким, інакше час перенесення буде обмежувати швидкість фотовідповіді. Високий опір i -області забезпечує падіння напруги переважно на ньому. Результуюче електричне поле підвищує швидкість фотовідповіді і зменшує шум. В результаті швидкодія таких фотодіодів значно зростає.

Окрім InSb матеріали, на яких можна реалізувати фотоприймачі для потрібного нам діапазону довжин хвиль (1-5 мкм), знаходяться з групи сполук АЗВ5. З простих бінарних сполук маємо арсенід індію (ширина забороненої зони 0.35 еВ), антимонід галію (ширина забороненої зони 0.7 еВ). Також арсенід індію має більш складну технологію формування з'єднання оскільки арсенід має велику пружність біля точки плавлення і може «вийти» із структури також його очищення

відбувається складнішим чином ніж InSb. Схожу спектральну залежність виявляючої здатності має КРТ (Cd,Hg,Te). Хоча він є доволі корисним в ІЧ детектуванні матеріал має ряд недоліків, а саме високу чутливість залежності ширини ЗЗ від співвідношення складу сплаву, що вимагає точного контролю над температурою росту під час виготовлення, велика неоднорідність на більшій площі через високий тиск пари Hg, що спричиняє високий темновий струм в пристроях КРТ, великий тунельний струм через низьку ефективну електронну масу. На основі порівняння роблю висновок, що InSb є більш придатним матеріалом для високоефективного фотодетектора середнього ІЧ діапазону.

1.3. Теплове випромінювання

Нагріті тверді і рідкі тіла мають характерний безперервний розподіл випромінювання по спектру довжини хвиль з максимумом, значення якого залежить від температури джерела. Ці джерела називають тепловими, а тіла зазвичай перебувають в стані термодинамічної рівноваги. Випромінювання електричного розряду або полум'я не безупинно по спектру довжини хвиль, а сконцентровано у вузьких діапазонах - лініях і смугах. Такі джерела випромінювання називають селективними. Прикладами селективних джерел є двигуни літаків і ракет, факели.

Фундаментальним поняттям для розуміння теплового випромінювання є поняття про абсолютно чорне тіло (АЧТ), тобто тіло, що поглинає все випромінювання будь-яких довжин хвиль, падаюче на нього.

Законом Планка описується спектральний розподіл випромінювання АЧТ:

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/kT\lambda} - 1} \quad (1.6.)$$

Формулу (1.6.) зазвичай записують :

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/T\lambda} - 1} \quad (1.7)$$

де W_{λ} – спектральна густина випромінювання, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$; λ - довжина хвилі, мкм; $C_1 = 2\pi^5 h^6 C^2 = 3,74 \cdot 10^4 \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$; $C_2 = \frac{ch}{k} = 1,44 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$;

Спектральна густина випромінювання АЧТ в інтервалі температур від 500 до 900 К відображена на рисунку 1.5.

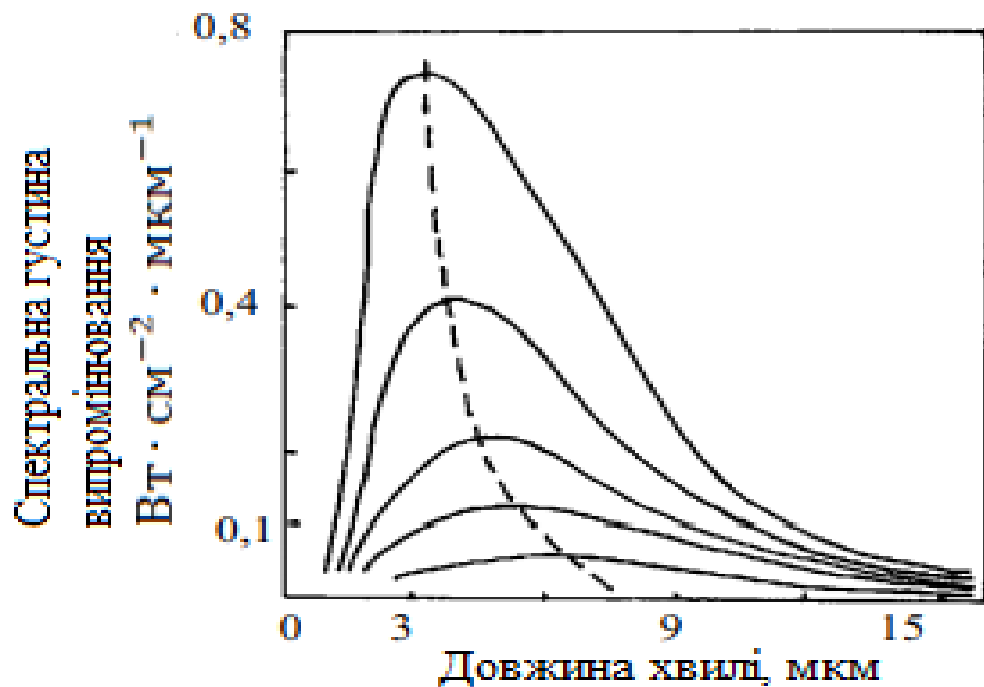


Рисунок 1.5. – Графік залежності спектральної густини випромінювання від довжини хвилі випромінювання[3]

Із рис.1.5. видно, що променистий потік, випромінюваний АЧТ, швидко збільшується при збільшенні температури. Закон цього зростання можна отримати, якщо проінтегрувати рівняння Планка:

$$w = \int_0^{\infty} w_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (1.8)$$

Дане співвідношення називається законом Стефана-Больцмана, а σ -постійна Стефана-Больцмана:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \quad (1.9.)$$

Отже, повне випромінювання АЧТ зростає пропорційно T^4 . Якщо продиференціювати рівняння Планка отримаємо закон зміщення Віна:

$$\lambda_{max} T = a, \quad (1.9.)$$

де λ_{max} – довжина хвилі, на якому спостерігається максимумальний розподіл спектральної густини випромінювання по довжинам хвиль, а $a = 2,898 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ [5].

Висновок до розділу:

Найбільш оптимальним для заданих цілей слугує діапазон чутливості 2-5 мкм. Найбільш відповідним матеріалом із всіх розглянутих для виготовлення домішкового фотодіода є InSb, оскільки має високу квантову ефективність, найбільш опрацьовану технологію виготовлення і необхідну спектральну чутливість.

2. ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ НА ОСНОВІ InSb

2.1. Іонна імплантація

2.1.1. Особливості та установка для методу іонної імплантації

Метод іонної імплантації базується на впровадженні в тверде тіло прискорених в електростатичному полі іонізованих атомів і молекул. При цьому можливі будь-які комбінації іон-мішень. Енергію іонів можна змінювати в межах кіло-мега електрон-вольт. Глибина імплантації іонів залежить від енергії та маси іонів, а також від маси атомів мішені. Наприклад, середній пробіг іонів фосфору в кремнії з енергією 10 кеВ складає близько 14 нм, а іонів бору з енергією 1 МеВ близько 1756 нм. Іонна імплантація дозволяє змінювати властивості приповерхневої області твердого тіла: електрофізичні, механічні, корозійні, каталітичні, оптичні, емісійні.

Іонна імплантація є одним з основних методів введення домішок в напівпровідникові кристали. Раніше найпоширенішими способами введення домішок були: введення домішок в процесі епітаксії, дифузія і сплав. За допомогою епітаксії можна нарощувати на кристал шари із заданою концентрацією домішок; дифузний метод заснований на дифузії домішкових атомів з поверхневого шару в напівпровідник. Нарешті, при сплаві прилеглий до поверхні шар напівпровідника розплавляють і в процесі подальшої рекристалізації (затвердіння) збагачують домішковими атомами.

Перевагою методу іонної імплантації перед іншими є те, що він не залежить перш за все від меж хімічної розчинності, температури в процесі імплантації, концентрації матеріалу домішки на поверхні напівпровідника. З її допомогою є можливість створити з'єднання і сплави, які не можна отримувати традиційними методами та досягти концентрацій домішки, що перевищують межу розчинності даної домішки в речовині твердого тіла. При сприятливих умовах імпантовані атоми можуть вступати в хімічні зв'язки з атомами мішені. Концентрація

імплантованих атомів має розподіл по глибині, який в загальному випадку можна описати нормальним.

До переваг методу також можна віднести: скорочення тривалості процесу введення домішки, однорідність розподілу по поверхні, можливість контролю кількості атомів домішки, що особливо важливо при низьких концентраціях, висока чистота процесу, оскільки в прискорювачах іони поділяються за масами за допомогою мас-сепараторів, низька температура процесу, мала глибина впровадження іонів, що дає можливість легування тонких приповерхневих шарів, можливість багатоступінчастої імплантації дає змогу створити профіль розподілу імплантованих атомів заданої форми, сумісність з процесами планарної технології.

Серйозним недоліком іонної імплантації є утворення дефектів кристалічної структури напівпровідника. Через дефекти змінюються електрофізичні властивості напівпровідників; крім того більшість впроваджених атомів стають електрично не активні оскільки займають нерегулярні положення в решітці.

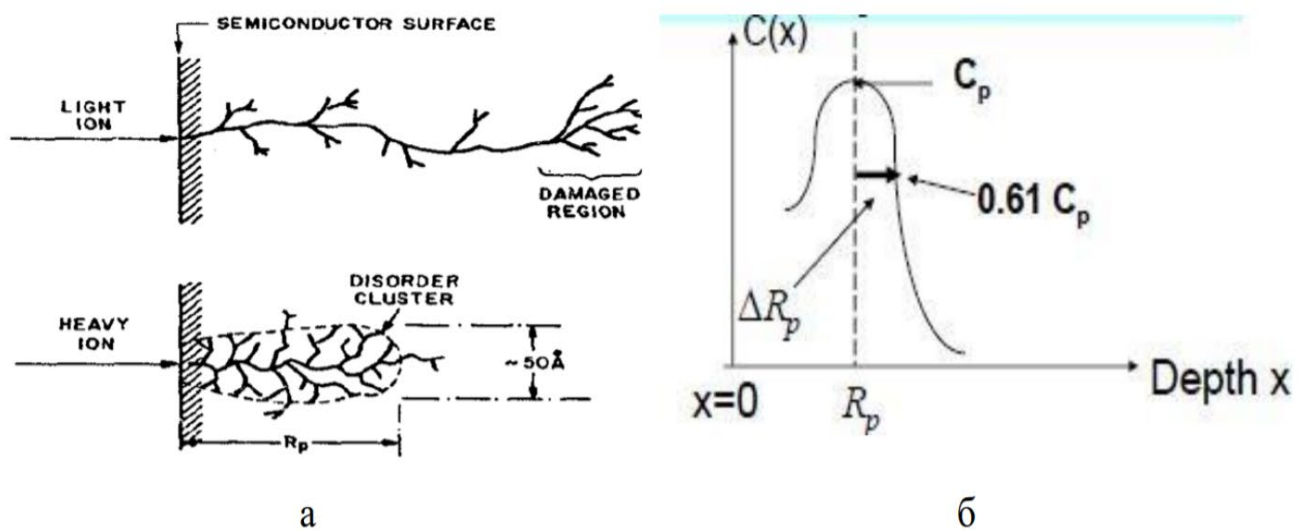


Рисунок – 2.1. Схематичне зображення взаємодії атомів з легкими та важкими іонами (а) та профіль розподілу імплантованої домішки, апроксимований гаусіаном (б)

Другим недоліком є невелика глибина легування, що є критичною проблемою для створення ряду електронних приладів таки як силові діоди і транзистори. Щоб це виправити можна підвищити напругу імплантації до

декількох MeV однак установки з такою потужністю є дуже дорогими, також слід розуміти, що при високоенергетичній імплантації формуються складні дефекти структури, які не усуваються термічним відпалом.

До третього обмеження методу імплантації можна віднести ефект каналювання іонів і радіаційно - прискорена дифузія імплантованих атомів. Ці ефекти перешкоджають теоретичному передбаченню профілю. Частіше вони виявляються в глибокому проникненні впроваджених атомів і в більш складній ніж нормальна форма розподілу імплантованих атомів.

Тому найважливішими проблемами методу іонної імплантації є: підвищення електричної активації імплантованих атомів, визначення форми розподілу впроваджених атомів, відпал дефектів та дослідження впливу процесу імплантації на рухливість і час життя носіїв заряду[4].

Установки іонної імплантації бувають з різною інтенсивністю іонного пучка. Установки іонної імплантації (рис. 2.1.) складаються з джерела імплантованих іонів 1, іонопроводу 2, магнітного мас-сепаратора 3, приймача іонів 5, насосів високого вакууму 6 і вакуумної системи. Відрізняються вони можуть потенціалом робочої камери щодо землі і взаємним розташуванням робочої камери, мас-сепаратора і джерела іонів.

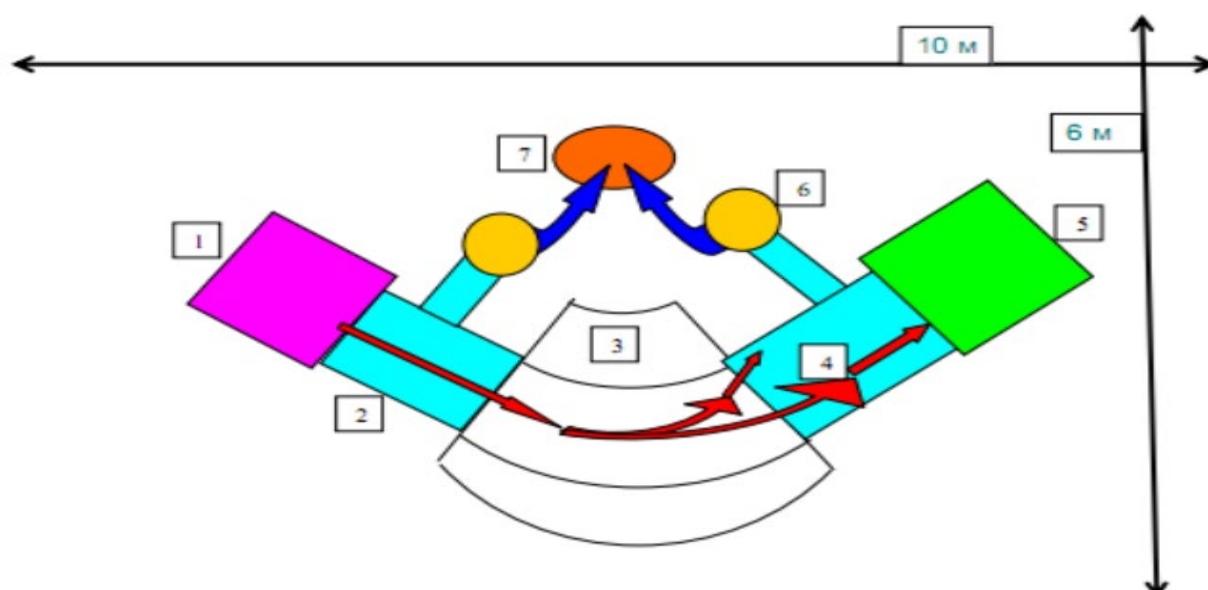


Рисунок 2.2. – Схема іонно-променевого прискорювача: 1 - джерело іонів, 2 - іонопровід, 3- магніт мас-сепаратора, 4 – траєкторія іонів, 5 – приймач іонів (колектор), 6 - насоси високого вакууму, 7 - форвакуумних насос [5]

Установки для імплантації середніх і малих доз, енергія іонів в яких не перевищує 200 кеВ, а робоча камера знаходиться під потенціалом землі, найбільш широко використовують. Оскільки магнітна сепарація іонів здійснюється до прискорення, енергія іонів в сепараторі низька, що визначає габарити та характеристику установки (малі магніти, малопотужні джерела живлення електромагнітного сепаратора і прискорювальної системи).

Установку з поділом іонів імплантації по масах після прискорення в основному використовують для досліджень. Висока роздільна здатність магнітного сепаратора та мінімальна кількість спожитої електроенергії високої напруги, в установці прискорює весь пучок іонів, що викликає збільшення струму навантаження високовольтного джерела живлення, а також збільшення вторинної електронної емісії, що несе в собі небезпеку опромінення рентгенівським випромінюванням.

Високоенергетична установка дозволяє отримати високу енергію іонів (500 кеВ і вище). Виникає сильне рентгенівське випромінювання. Велику енергію (1 - 2 МеВ і більше) простіше отримувати використовуючи багатозарядні іони.

В установці великих доз джерело іонів імплантації знаходиться під високою напругою. Прискорення відбувається в системі первинного формування пучка, що дає можливість автоматизування всіх режимів роботи.

2.1.2. Вплив іонної імплантації Be та Mg на структурні властивості опроміненої області

Головною задачею під час створення діодів є формування р-п переходу. Оскільки даний матеріал є термічно нестабільним оптимальним є використання методу іонної імплантації для легування даної структури [5]. Однак, метод іонної імплантації призводить до утворення точкових дефектів. Також зазначимо, що дефекти виступають в якості донорних центрів і призводять до перекомпенсації при утворенні шарів з р-типом провідності [6]. Тому виникають певні обмеження відносно вибору елемента імплантованої домішки та дози легування. Основна

відмінність між проімплантованим InSb та іншими матеріалами (Si, Ge, GaAs), обумовлена фізичними та механічними властивостями вихідного матеріалу, а дефекти точкового випромінювання є досить рівномірними для всіх радіаційних випромінювань.

Виникнення структурних дефектів при імплантації та їх модифікація призводить до утворення порожнеч, які створюють пористу структуру та підвищують рівень пружно-механічної деформації. Поверхневий шар після імплантації може представляти собою суміш аморфної та полікристалічної фаз InSb. Аморфна фаза складається з нестехіометричних сполук In і Sb та продуктів реакції з адсорбованими сторонніми атомами (найчастіше киснем). Для того щоб зменшити неупорядкований шар InSb доцільно нанести тонкий діелектричний захисний шар.

На сьогоднішній день було встановлено, що в якості легуючої домішки найбільш ефективно використовувати іони Be^+ або Mg^+ . При формуванні p-n переходу методом імплантації іонів магнію виникає більше дефектів структури, ніж при імплантації іонами берилію, за рахунок більшої маси атомів магнію [7]. Досліджуючи морфологію поверхні, що піддається впливу іонів Mg^+ , можна спостерігати появу шорсткої поверхні, колір поверхні спочатку сіро-матовий, а після імплантації через неупорядковану зміну відбивної здатності InSb області коричнево-сірого кольору. Після швидкого термічного відпалу, спрямованого на усунення дефектів структури, в імплантованій поверхні не відбувається істотних змін. Глибина залягання дефектів при високій енергії та високій дозі перевищує очікуваний діапазон розподілу. В результаті, утворені імплантацією дефекти не можуть бути повністю усунені у процесі відпалу. Тому оптимальною легуючою домішкою для використання є берилій. Однак, необхідна додатково оптимізувати технологічний маршрут та параметри імплантації. Найбільш корисними методами оптимізації параметрів іонної імплантації є моделювання її проходження, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія та мас-спектрометрія вторинних іонів виготовлених зразків. Моделювання процесу іонного легування дає змогу розрахувати профіль розподілу імплантованого елемента та розподіл дефектів,

викликаних імплантацією. На сьогоднішній день існує ряд програм які використовуються для цих розрахунків: SRIM, ISE TCAD, Lumerical DEVICE та інші. Визначення розподілу домішок в іонно модифікованих структурах здійснюється методом мас-спектрометрії вторинних іонів [8]. Метод дозволяє визначити розподіл домішок і по глибині матеріалу, і по площі. Розподіл дефектів, утворених шкідливих оксидів в ньому визначаються методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії.

2.2. Швидкий термічний відпал

Для усунення утворених дефектів структури, а також перенесення легованих атомів в електрично активні положення в кристалічній решітці необхідне проведення термічної обробки пролегованих зразків. Це може бути рівноважний відпал в печах, або нерівноважний (швидкий) фотонний, електронний, лазерний відпал. Відпал легованого кремнію відбувається при низьких (400 - 600 ° C) або високих (200 - 1000 ° C) температурах. При відпалі вище 1000 ° C разом з відпалом відбувається розгонка впроваджених атомів домішки. Під час високотемпературного відпалу значна частина порушень відновлюється, але залишаються зазвичай великі і вплив їх необхідно враховувати.

При температурі біля 1000 ° C і вище з розгоном впроваджених атомів домішки одночасно іноді збільшується кількість структурних дефектів і спостерігаються за межами легової області. Це значить, що навіть високотемпературний термічний відпал не гарантує повністю усунення структурних дефектів.

При низькотемпературному швидкому відпалі залишаються значні порушення структури, але їх міграція не суттєва. Оскільки, ближче до поверхні структури знаходиться найбільша кількість дислокацій, а не легуючих атомів, їх вплив на p-n перехід невеликий. Тому швидким низькотемпературним термічним відпалом усуваються в більшості випадках порушення поблизу переходу, що забезпечує його високу якість. Швидкий низькотемпературний відпал

застосовують у випадках, коли шари металізації, елементи напівпровідникових приладів або матеріал не витримують високих температур.

InSb має низьку температуру плавлення та також берилій заміщує позиції індію під час іонної імплантації. Таким чином для відновлення кристалічної структури в процесі відпалу необхідно усунути стехіометричні дефекти легованого шару, оскільки вони приводять до низького термо-ЕРС, що є негативним ефектом, тому було вирішено при виготовленні фотодіода використовувати низькотемпературний відпал.

Два температурні інтервали 290-330 оС і 360-390оС є найбільш ефективними для зміни типу провідності легованого шару. Це можна пояснити двома різновидами структурних дефектів з різною енергією зв'язку $E_1 = 2,96$ еВ і $E_2 = 6,21$ еВ відповідно. E_1 відповідає енергії активації руху вакансій InSb, відпал на першому температурному інтервалі, - це скупчення вакансій індію. Відпал у другому температурному діапазоні усуває дефекти, які можуть включати вакансії індію, що містять атоми берилію, стибію та інші домішки. Виявлено, що найбільш ефективно усувати дефекти в двоступеневому режимі. На першому етапі відпалу температура становить 300-330 ° С і відбувається близько 40-120 секунд. Друга стадія відбувається при температурі 385-400 ° С протягом близько 10-20 секунд. Перетворення провідності в двоступеневому режимі є більш ефективним, ніж у режимі одностадійного відпалу і може досягати до 90% активації атома домішки.

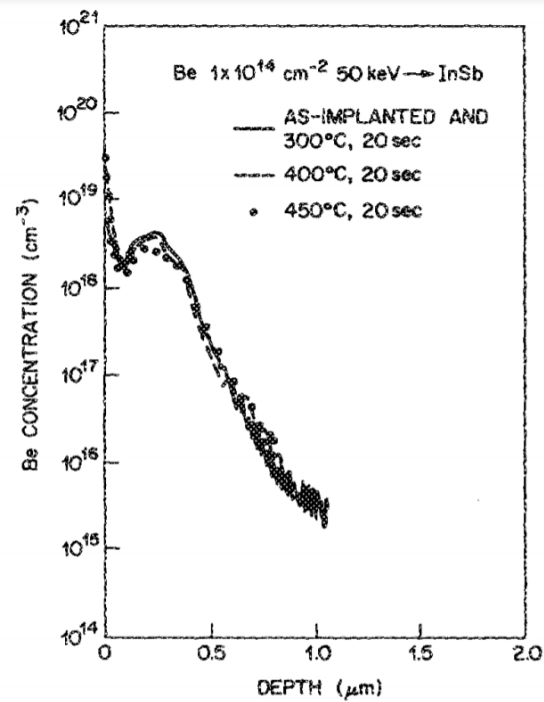


Рисунок 2.3. – Профілі SIMS із імпантованим Be в InSb перед і після термічного відпалу[10]

Є кілька моментів, на які слід звернути увагу. По-перше, по суті немає перерозподілу Be на стороні імпантациї. Це узгоджується з раніше повідомленими результатами імпантациї Be, Cd та Zn в GaAs, відпалених з використанням того самого методу. Другий, відбувається дифузія Be на поверхню, що призводить до зменшення пікової концентрації. Оскільки дифузію можна зменшити за допомогою імпантациї елемента групи V і це пов'язано з швидким перерозподілом на поверхню, спричиненим нестехіометричними областями, спричиненими нерівною віддачою In та Sb. Оскільки буде надлишок In в цій області, існує менше можливостей для Be займати вакантні місця в In-решітці[10]. Sb же дифундує на поверхню матеріалу і утворює оксиди. Тому робимо висновок, що нанесення захисного діелектричного покриття та відпалу буде недостатньо для створення задовільної структури.

2.3. Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС)

Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС) є високорезультативним способом дослідження розподілу домішкових елементів у твердих тілах та ін. Спрощена схема установки з іонним джерелом, вакуумною камерою і аналізатором представлена на рис. 2.5. Поверхня досліджуваного зразка розпорошується при опроміненні іонами із заданою енергією в декілька кеВ. Частина розпорошених атомів мають електричний заряд і аналізується з допомогою мас-спектрометра. Однак при використанні ВІМС виникають деякі проблеми, а саме:

- а) забезпечення стабільної швидкості розпилення;
- б) отримання даних "плоского розпилення";
- в) підтримання стабільної швидкості іонізації;
- г) вплив фонового детектування первинних частинок;
- д) ефект атомів віддачі.

Основною перевагою методу є те, що він дозволяє дослідити всі елементи і має доволі високу чутливість, яка залежить від елемента і складає від 10^{15} до 10^{18} см⁻³.

Для забезпечення стабільної швидкості розпилення іонів необхідно використовувати якісне джерело. Розпилення роблять за допомогою гостро сфокусованого іонного пучка, що сканується по досліджуваній поверхні, або за допомогою пучка з сталою щільністю струму по радіусу. При першій методиці є можливість отримати картину об'єкта досліджень, при другій - полегшується завдання отримання "плоского" розпилення при проведенні досліджень на великих глибинах .

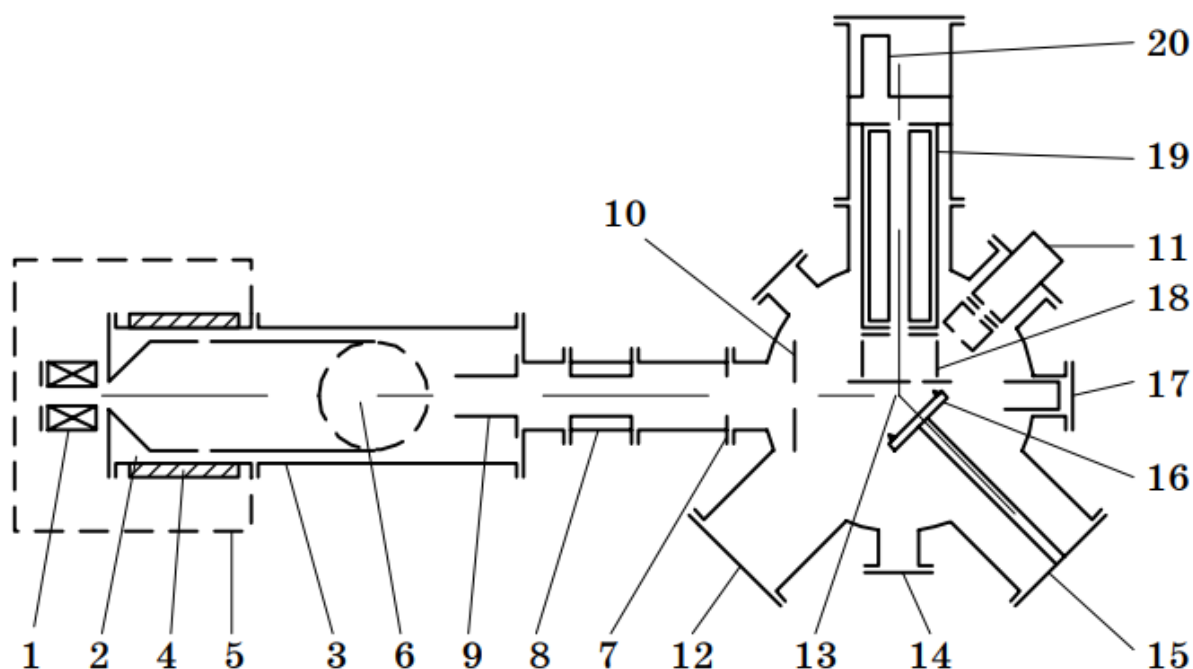


Рисунок 2.4. – Схема установки ВІМС: 1 - іонне джерело; 2 - витягуючий електрод; 3 - прискорюючий електрод; 4 - керамічний ізолятор; 5 - захисний кожух; 6 - турбомолекулярний насос; 7 - щілина для перепаду тиску; 8 - прохідний вентиль; 9 – відхиляючі пластини (2 пари); 10 - діафрагма; 11 - аналізатор залишкових газів; 12 - оглядове вікно; 13 - вакуумний насос; 14 - струмопідведення; 15 - пристосування для повороту мішені; 16 – тримач мішені; 17 - циліндр Фарадея; 18 - енергоаналізатор; 19 - квадрупольний масаналізатор; 20 – детектор[11]

Швидкість іонізації залежить від хімічного складу газу на поверхні поверхні. Як приклад, кисень зазвичай збільшує швидкість іонізації в 100 раз. Тому деякі установках використовують розпорошення іонами кисню. Дуже важливим для забезпечення стабільної швидкості іонізації є також тиск вакуумної системи, який повинен бути не більше 10^{-5} Па[11]. При високих прискорюючих енергіях стає помітним ефект атомів віддачі під дією бомбардують частинок. Як компроміс максимальну енергію бомбардують частинок приймають рівною 20 кеВ.

Якщо врахувати вплив усіх недоліків, то профіль розподілу концентрації домішки цим методом знаходять доволі просто, детектуючи кількість атомів аналізованих елементів, розміщених на відповідній глибині. ВІМС може здійснювати реєстрацію різних мас, що дозволяє одночасно визначати розподілу декількох елементів [11].

2.4. Обробка поверхні

2.4.1. Абразивна обробка поверхні підкладок

Для того щоб виготовити фотодіод на основі InSb використовують пластину, вирізану з злитків вирощених методом Чохральського, поверхня має бути підготовлена для формування характерних структур, а саме рп-перехід, який є чутливим елементом фотодіодів. Процес обробки поверхні пластини заснований на раніше розробленому технічному маршруті обробки поверхні таких матеріалів як Si, Ge або GaAs. Ці стандартні маршрути включають в себе механічне розрізання злитків на пластини, точне багатоступеневе механічне шліфування та полірування поверхні. Деформовані шари, що утворюються на поверхні матеріалу після механічного шліфування, усуваються хімічним механічним поліруванням та хімічним динамічним поліруванням [12]. Головним завданням полірування та хімічної обробки поверхні InSb є забезпечення характерних параметрів концентрації та рухливості основних носіїв заряду та фотоелектрики. Тому площа поверхні та поверхня матеріалу є сталими. Проблема обробки поверхні пластини InSb ускладнюється тим фактом, що область механічного напруження виникає через особливості формування пошкоджень під час механічного полірування та низьких механічних властивостей InSb. Створення р-п переходу знімає ці напруги і створює точкові та лінійні дислокаційні дефектів. Зміна структурних властивостей матеріалу біля поверхні впливає на час життя нерівноважних носіїв заряду. Зміщення характерних параметрів матеріалу відбувається також під час підготовчих операцій з виготовлення стиків р-п. Оскільки глибина залягання рп-переходу становить $\leq 1\mu\text{m}$, слід відзначити, що зміна електрофізичних та фотоелектричних характеристик поблизу поверхні пластини сильно впливає на експлуатацію рп-переходу. Технічний процес обробки поверхні нашого напівпровідникового матеріалу забезпечує виконання таких завдань:

- 1) Виготовлення геометрично ідеальної поверхні пластини із специфічною кристалічною орієнтацією. Це необхідно, щоб відповідати вимогам до фотолітографії.

2) Відсутність поверхневої ділянки неупорядкованого шару та механічних напружень, що виникають під час полірування поверхні пластини з дефектами;

3) Утворення поверхні правильного стехіометричного складу. Це збільшує ймовірність відсутності потенційного бар'єру на гетеромежі субстрату та оксидів InSb.

4) Відсутність поверхневих забруднень, спричинених адсорбцією матеріалу та плівки оксиду.

Якість обробки поверхні контролюється такими параметрами:

1) Шорсткість RZ (сукупність чіткої мікрорівномірності поверхні, що створює мікро рельєф на поверхні);

2) Відсутність механічно деформованих шарів, які контролюються швидкістю травлення до глибини підкладки.

3) Кристалічною орієнтацією поверхні підкладки, допустимі межів від ± 1 до 2° .

4) Густина структурних дислокації на поверхні пластини.

5) Поверхнева стехіометрія.

Коли монокристалічний злиток розрізається на пластини алмазним диском або струною з абразивом, виникає взаємодія між більш твердими абразивними компонентами та напівпровідниковим матеріалом утворюється руйнівний шар. Різниця між пошкодженими областями, викликаними різанням або шліфуванням, полягає в основному в локалізації дефектів після розрізання абразивним диском чи ниткою, покритою абразивом. При хімічному поліруванні всі дефекти розподіляються рівномірно по поверхні пластини. Під час механічного полірування структура неупорядкованого шару відрізняється і складається з трьох областей: аморфного рельєфу, тріщини аморфної області та області пружної деформації високої густини. В аморфній області рельєфу нерівності сконцентровані і значно менші, ніж під час полірування. Ця область - це аморфна структура, а не полікристалічна структура. Дослідження структурно деформованих шарів та їх товщини необхідно проводити різними методами. Найбільш ефективними є рентгенографічні та рентгенівські методи. Інформацію про вплив дефектів

невпорядкованої області на час життя неосновних носіїв заряду та профіль розподілу неупорядкованих шарів травлення можна отримати з вимірювань спектрів імпульсної фотопровідності та магнітооптичних ефектів, а також спектрів фотолюмінесценції. Вимірювання вигину пластини, зруйнований шар, твердість, спектр відбиття, глибину рельєфу полікристалічного та механічного напруження під час травлення шару поверхні кількісне та якісне визначення поверхневого забруднення є можливість контролювати між операціями та стадіями, що виконуються за допомогою Оже-спектроскопії та ВІМС. Ці методи та електронної мікроскопії розкривають глибину залягання бар'єрного шару та локалізовані в ньому дефекти структури під час обробок поверхні. Поверхня пластини InSb (111) В була оброблена абразивними зернами з'єднання діаметром біля 14 мкм, а також досліджено вплив алмазного механічного полірування та хімічно-механічного полірування. В основі цієї методики лежить те, що швидкість травлення матеріалу залежить від умов та параметрів травлення. Після кожного етапу травлення визначали товщину стравленого шару та швидкість травлення. За глибину зруйнованого шару приймаємо товщину стравленого шару, спостерігали зміну швидкості травлення, дефектів не спостерігалось.

Таблиця 1. Глибина порушеного шару InSb [14]

Спосіб обробки	Глибина порушеного шару, мкм
Шліфування порошком КЗМ-14	58
Шліфування зв'язаним абразивом	39
Механічне полірування алмазною пастою АСМ-2	37
Механічне полірування алмазною пастою АСМ-1	35
Хіміко-механічне полірування	14

Вище наведене значення глибини ураженого шару залежно від способу обробки поверхні (табл. 1) . Склад полірувального травлення, що виконує травний шар InSb (111) В (об'ємний відсоток): фторводнева кислота 45% , винна кислота 25% та перекис водню 30% . NH_3O_3 CP-4 полірувальний травник: $\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 5:3:3$.

На етапі доведення відрізаної пластини до необхідної товщини, площинності та шорсткості її поверхні також використовували метод розмірного безконтактного хіміко-механічного полірування (БХМП), який не вносить додаткового порушеного шару в процесі формозміни підкладки. Характерними особливостями вказаного метода полірування є хімічне травлення поверхні напівпровідникової пластини в тонкому прошарку (пластина – полірувальник) розробленого травника з відсутністю контакту між полірувальником та оброблюваним зразком. Підтримка постійної ширини рідинного проміжку, заповненого травником, забезпечується флотаційною силою, що виникає під час руху інструменту. Ширина проміжку, що утворюється при операціях БХМП, залежить від швидкості взаємного переміщення зразка та інструменту і в середньому змінюється від декількох до десяти мікрон.

При заданих режимах БХМП полірувальник обертається з постійною швидкістю під поверхнею зразка кінцевої довжини. Умови полірування (дуже мала відстань між зразком та інструментом) дозволяють розділити потік травника на два нерухомих шари: один шар прилипає до полірувальника (конвективний шар) і рухається з ним, інший шар (дифузійний) прилипає до поверхні зразка. Ширина проміжку в кінцевій точці зразка утримується постійною і не змінюється в процесі травлення, що є істотною особливістю процесу формозміни при БХМП.

Активний компонент травника, що міститься в конвективному шарі, дифундує в поперечному напрямку до дифузійного шару рідини; потім відбувається дифузія реагенту через нерухомий шар до поверхні зразка і його хімічна взаємодія з оброблюваним матеріалом. Внаслідок хімічної реакції форма поверхні підкладки змінюється: відбувається утонення пластини; мікрогеометрія поверхні набуває шорсткості, значення якої визначається режимом полірування.



Рисунок 2.5. – Установа для безконтактного хіміко-механічного полірування підкладок InSb

На цьому принципі нами розроблена і виготовлена установка для безконтактного хіміко-механічного полірування підкладок, загальний вигляд якої приведений на рис.2.6. Розробка необхідних режимів БХМП монокристалічних підкладок InSb, проводили з використанням вказаного обладнання.

Пластини, діаметром 2 дюйма, отримані після операції дрітної абразивної різки зливка InSb, спочатку відмивали від поверхневих забруднень дистильованою водою та просушували. Далі пластини обтравлювали в травнику складом: $\text{HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{SO}_4 = 2\text{-}1\text{-}1$ на протязі 1-2 хвилин, при швидкості травлення 10 мкм/хв., знову промивали в дистильованій воді і висували.

За допомогою воску, в сушильній шафі, оброблювану підкладку клеїли на сателіт, який далі монтували в спеціальну касету; сателіт в касеті міг вільно переміщатися тільки у вертикальному напрямку. На поверхню полірувальника установки натягувався еластомір, матеріал та товщина якого задавалась умовами полірування підкладки. Пришліфована до полірувальника касета з сателітом фіксувалася на полірувальнику, що обертася з необхідною постійною швидкістю. Форма поверхні зразка до і після операції БХМП контролювалася профілометром-профілографом МОД 252 з точністю до 1 мкм.

В процесі проведення операції БХМП підкладки, в зону обробки, через систему прокачування подавався травник в режимі 10 – 20 мл/хв., складу: 1-3%Br₂ + HBr + етиленгліколь (ЕГ) = 3_{об.ч.} Br₂ + 80%_{об.ч.} HBr + 17_{об.ч.}ЕГ. Швидкість полірування підкладок InSb у вказаному травнику при температурі процесу 22⁰С складала 5-8 мкм/хв.

Після завершення операції БХМП підкладки послідовно промивали в розчинах молочної кислоти, ізопропиловому спирті та дистильованій воді (всі використовувані реактиви повинні мати марку «ОСЧ»).

Всього вказаним способом були виготовлено 6 підкладок, поверхня яких характеризувалась наступними параметрами: площинність (за винятком кільцевої зони 1-2мм на крайці зразків) – 4мкм/см, шорсткість R_z, ≤ 0,03мкм.

2.4.2. Хіміко-динамічне полірування

Хіміко-динамічне полірування – процес, у якому рельєф поверхні зменшується лише завдяки хімічній дії травильного розчину. Згідно з [15] найбільш ефективний процес згладжування нерівностей поверхні напівпровідникового матеріалу відбувається при ламінарному русі потоку протравлювача, що забезпечує концентраційний градієнт у дифузійному примежовому шарі δ[14].

Виникнення морфології поверхні при ХДП напівпровідника типу «апельсинової шкірки» може свідчити або про порушення умов ламінарного потоку протравлювача відносно поверхні матеріалу, або про невідповідність середньої висоти нерівностей рельєфу поверхні, яка призначена для полірування, товщині дифузійного шару δ. За теорією розчинення твердих тіл у рідких протравлювачах будь-яка гетерогенна реакція умовно містить принаймні три стадії: 1) перенесення інгредієнтів протравлювача до поверхні матеріалу; 2) хімічна реакція взаємодії компонентів матеріалу з реагентом; 3) відведення продуктів реакції із зони реакції. Якщо загальну швидкість розчинення твердого тіла позначити V , а швидкості кожної із стадій відповідно V_1, V_2, V_3 , то формула для знаходження загальної швидкості гетерогенної реакції за правилом Маттісена набуває вигляду:

$$V^{-1} = V_1^{-1} + V_2^{-1} + V_3^{-1}, \quad (2.1.)$$

Таблиця 2. Полірувальні протравлювачі для хімічної обробки InSb

№ п/п	Кристаліграфічна орієнтація поверхонь	Склад, температура травлення T_{mp} , час травлення t_{mp}	Швидкість травлення, мкм/хв	Стан поверхні, стехіометрія	Посилання
1.	(100), (110)	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 5:5:2$, $T_{mp} = 25-29^\circ\text{C}$, $t_{mp} = 20$ с	–	–	[52]
2.	(100) (111)А (111)В	СР-4. $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HAc} = 5:3:3$, $T_{mp} = 20-30^\circ\text{C}$, $t_{mp} = 5-30$ с	–	полірувальний для InSb, дзеркальна поверхня типу «апельсинова шкірка»	[52]
3.	(100), (110)	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O} = (2-10):(5-20):(30-40)$, залишок вода, $T_{mp} = 20-30^\circ\text{C}$	2–20 мкм/хв; висока швидкість травлення відповідає складу $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = 10:20:40$, залишок H_2O	полірувальний, відсутня окисна плівка, $R_z \leq 0,02$ мкм	[22]
4.	(100), (111)В	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HAc}:\text{H}_2\text{O} = 2:1:1:10$, T_{mp} – кімнатна	~6 мкм/хв	поверхня дзеркальна, $R_z \sim 0,02$ мкм	[33,34]
5.	протравлювач для визначення полярності (111)А або (111)В	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 2:2:16$, T_{mp} – кімнатна	–	–	[40]
6.	(111)А, (111)В	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6 = 4:1:25$, T_{mp} – кімнатна	–	дзеркальна поверхня вигляду «апельсинова шкірка». (111)А – більш дзеркальна	[40]
7.	протравлювач для (111)В; на стороні (111)А – круглі ямки	$\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = 1:14:20$ T_{mp} – кімнатна	–	(111)В має дзеркальний вигляд	[40]
8.	(100), (111)А, (111)В, (110)	винна кислота+ H_2O_2 +NaCl	хіміко-механічне полірування	$R_z \cong 0,03-0,05$ мкм, присутні оксидні форми Sb_2O_3 та In_2O_3	[31]
9.	–	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = (60-30):(50-15):(40-0)$, $T_{mp} = 296$ К, $\gamma = 120$ об/хв	1–27	дзеркальна, $R_z \cong 0,05$ мкм	[24]
10.	не залежить	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH} = (30-60):(55-20):(40-0)$, $T_{mp} = 296$ К, $\gamma = 120$ об/хв	10–30	дзеркальна	[24]
11.	–	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = (10-74):(24-90):(0-22)$, $T_{mp} = 294$ К, $\gamma = 86$ об/хв	1–30	дзеркальна	[24]

тоді для оцінки загальної швидкості гетерогенної реакції будемо мати:

$$V=V_1V_2V_3/(V_2 \cdot V_3 + V_1 \cdot V_3 + V_1 \cdot V_2) \quad (2.2.)$$

З (2.2) видно, що найменша складова швидкості буде визначати загальну швидкість гетерогенної реакції розчинення матеріалу. У випадку, коли найменшу швидкість має підведення інгредієнтів протравлювача до поверхні або відведення продуктів реакції проводяться з найменшою швидкістю, процеси відбуваються виключно у дифузійному примежовому шарі δ , і тому вважають, що загальний процес розчинення матеріалу відбувається за дифузійною кінетикою. Якщо найповільнішою стадією є хімічна реакція взаємодії інгредієнтів протравлювача з компонентами поверхні матеріалу, вважають, що швидкість розчинення матеріалу відбувається за кінетикою хімічних перетворень, і відповідно називають кінетичною. У випадку, якщо швидкість переносу інгредієнтів протравлювача до поверхні матеріалу дорівнює швидкості хімічних перетворень на поверхні, вважають, що процес розчинення матеріалу відбувається за змішаною кінетикою [14]. Склад полірувальних травильних композицій наведено у табл. 2.

2.5. Методи моделювання параметрів

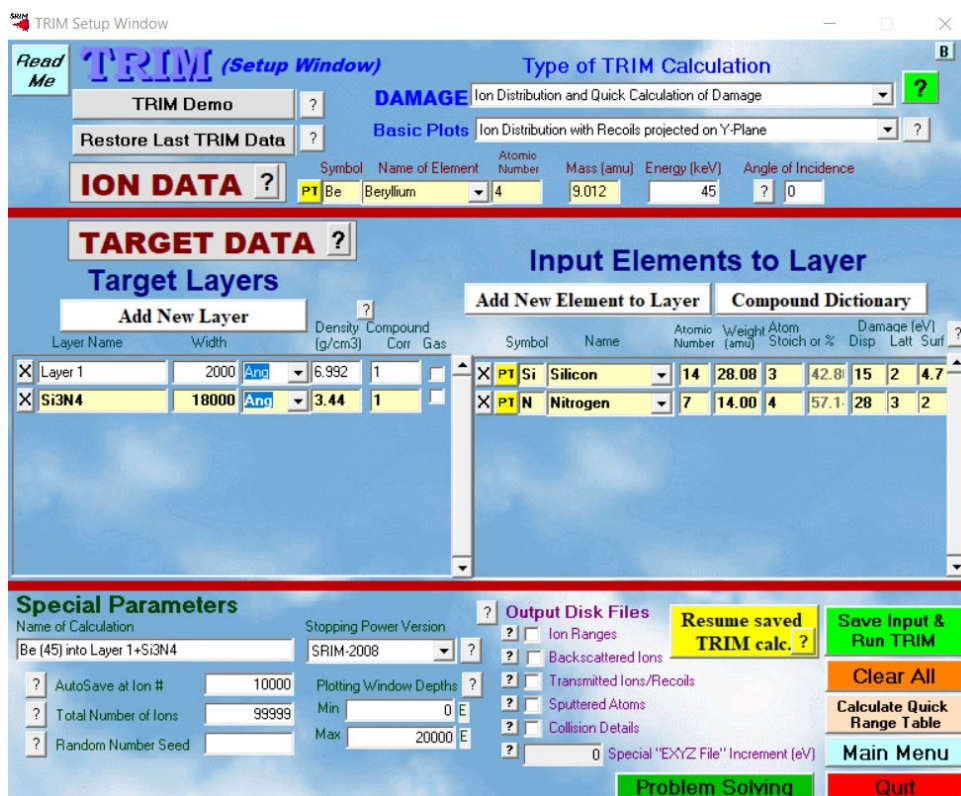
2.5.1. Моделювання в SRIM

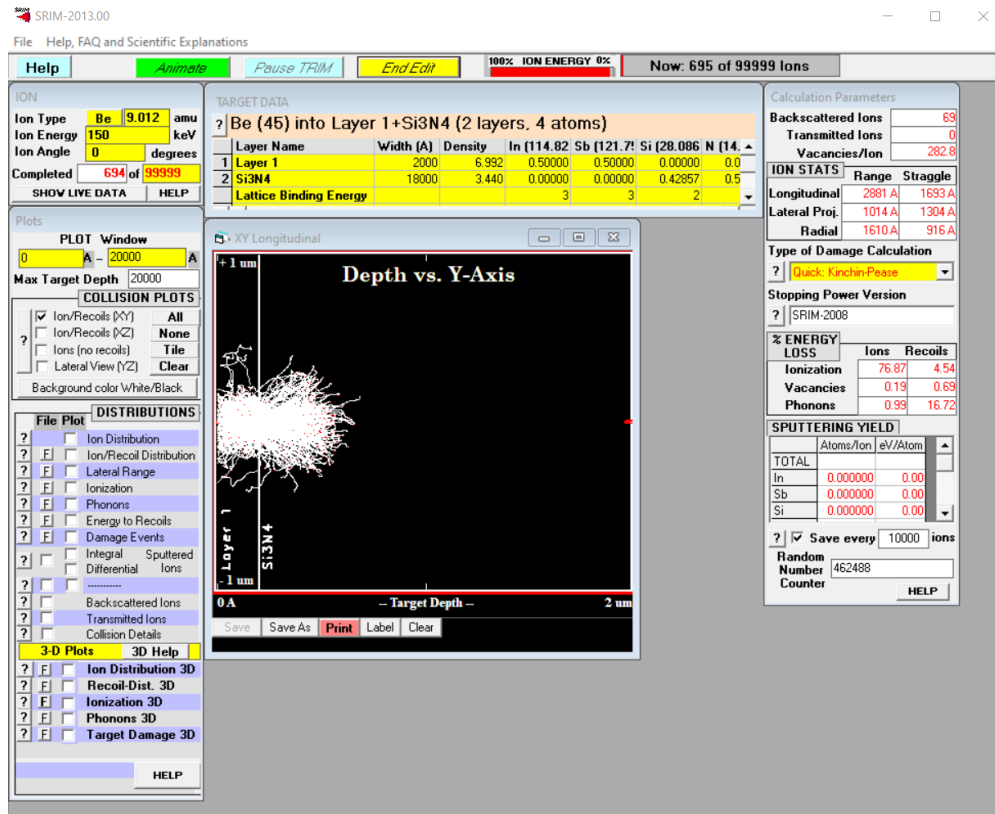
Профілі розподілу імплантованих домішок моделювались за допомогою програми SRIM, в якій для розрахунку використовується метод Монте-Карло. Дана програма дає можливість моделювати взаємодію матеріалів з іонним пучком, як одноелементних, так і таких структур, що складаються з декількох атомів. Під час моделювання імплантації твердого тіла іонами домішок програма дає можливість провести моделювання як взаємодії з об'ємними матеріалами, так із структурами з декількома шарами. За допомогою цього ПЗ можна отримати профіль імплантації, кількість і розташування точкових дефектів, розпорошення поверхні, змішування границь розділу шаруватих структур. На рис 2.7а показаний як виглядає вікно ПЗ

SRIM, в якому необхідно задавати параметри моделювання. У даному вікні робочий простір поділяється на такі частини: ION DATA: цим параметром задається тип іонів, їх енергія імплантації та кут падіння. Вказується тип розрахунку, параметри які будуть розраховані. TARGET DATA: в цьому блоці ми вказуємо параметри мішені для імплантації. Блок поділений на дві частини:

Target Layers: в цьому наводять параметри шарів поверхні – товщина і густина. Густина є важливим параметром, оскільки дозволяє розрахувати пористість побудованих плівок. Input Element to Layer: в цій частині зазначається саме, які хімічні елементи, присутні в певному шарі мішені. Також є можливість завантажити елементний склад із бібліотеки матеріалів, у тому числі органічні сполуки та з'єднання. Special Parameters: в даному блоці ми вказуємо, які дані отримаємо після закінчення розрахунку.

На рис 2.7б зображене вікно моделювання. На ній зображено взаємодію зазначених падаючих іонів з мішенню. Також є можливість відкрити вікна розрахунку розподілу домішки, утворених фононів, внесених дефектів, іонізації в різних площинах і в 3D.





6

Рисунок 2.6. – Вид робочих вікон програми SRIM&TRIM

2.5.2. Моделювання в Lumerical FDTD

Програмне забезпечення Lumerical FDTD є високопродуктивною програмою для вирішення рівнянь Максвелла методом FDTD з метою розробки, аналізу та оптимізації нанофотонних пристроїв, процесів і матеріалів. Завдяки використанню методу кінцевих різниць у часовій області (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) інструмент Lumerical FDTD дозволяє вирішувати найбільш комплексні проблеми фотонної розробки. Швидке прототипування і високоточна симуляція зменшують необхідність в дорогих експериментальних прототипах, що не тільки дає можливість швидше визначати і знижувати вартість розробки і випуску продукції а й дає змогу промоделювати характеристики готового пристрою для навчальних цілей. Моделювання - це чудовий спосіб оцінити та оптимізувати параметри проектування перед виготовленням фізичних пристроїв. Моделювання також можуть бути використані для перевірки отриманих експериментальних

результатів. Продукт Lumerical FDTD здатний значно прискорювати досягнення успіху в роботі від фундаментальних фотонних досліджень до інженерних систем у різних сферах.

Методи скінченних різниць, методи сіток — чисельні методи розв'язку інтегро-диференціальних рівнянь алгебри, диференціального, інтегрального числення, основані на заміні диференціальних операторів різницевиими операторами, інтегралів — сумами, а функцій неперервного аргументу — функціями дискретного аргументу. Така заміна приводить до системи, взагалі кажучи, нелінійних алгебраїчних рівнянь, які зрештою зводяться до лінійної системи деяким ітераційним методом. Саме метод скінченних різниць у часовій області — один з найпопулярніших методів числової електродинаміки, для вирішення рівнянь Максвелла в часовій області. Рівняння розв'язуються чисельно на дискретній сітці як у просторі, так і в часі, це означає, що електричне та магнітне поля, E та H відповідно, дискретні у просторі та часі. FDTD відноситься до загального класу сіткових методів розв'язку диференціальних рівнянь.

Базовий алгоритм методу був вперше запропонований Кейном Йі в 1966 р. в статті «Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media» журналу «IEEE Transactions on Antennas and Propagation». однак, назва «Finite-difference time-domain» та аббревіатура FDTD були дані методу Аленом Тафловим[20].

В первісному вузькому сенсі під FDTD малось на увазі використання базового алгоритму Йі для числового розв'язку рівнянь Максвелла. В сучасному більш широкому сенсі FDTD включає в себе безліч найрізноманітніших можливостей: моделювання середовищ з дисперсійними і нелінійними властивостями, застосування різних типів сіток (окрім, первинно запропонованої прямокутної сітки Йі), використання методів постпроцесорної обробки результатів і т.д.

Приблизно з 1990 р. метод скінченних різниць став основним для моделювання найрізноманітніших оптичних застосунків. Він може з успіхом бути застосованим для розв'язку широкого спектру задач: від моделювання наддовгих

електромагнітних хвиль в геофізиці та мікрохвиль (наприклад, для вивчення сигнатурної радіолокації, розрахунку характеристик антен, розробки безпроводних пристроїв зв'язку, в тому числі цифрових) до розв'язку задач в оптичному діапазоні. До 2006 р. кількість публікацій, присвячених FDTD, досягла двох тисяч. На даний момент існує близько 30 комерційних програм FDTD, а також проекти з відкритим вихідним кодом.

FDTD зазвичай використовується, коли розмір конструкції, об'єкта знаходиться на порядку довжини хвилі. Цей режим, де дифракція, інтерференція, когерентність та інші подібні ефекти відіграють критичну роль, називається хвильовою оптикою. Коли розміри значно перевищують довжину хвилі, інші методи, такі як трасування променів, є більш ефективними.

В рівняннях Максвела зміна електричного поля E (часткова похідна) залежить від розподілу в просторі магнітного поля H (ротор). Аналогічно, зміна поля H залежить від розподілу в просторі поля E . На цьому спостереженні базується алгоритм Йі. Сітки полів E та H по відношенню один до одного на половину кроку дискретизації часу і по кожній з просторових змінних. Кінцево-різницеві рівняння дозволяють визначити поля E та H на даному часовому кроці на основі відомих значень полів на попередньому.

При заданих початкових умовах алгоритм Йі дає розв'язок в часі від початку відліку зі заданим часовим кроком. Оскільки він визначає значення для всіх векторних компонентів електричного та магнітного полів, це повністю векторний метод моделювання. Крім E і H , ми повинні також дискретизувати електричну проникність (епсилон). У більшості випадків це дуже просто, оскільки ми можемо призначити проникність будь-якого матеріалу. Однак поблизу поверхні, яка поруч з поверхнею іншого матеріалу, це стає набагато складніше, оскільки поверхня може проходити через клітинку Йі в будь-якому положенні та орієнтації. Як результат, нам потрібне різне значення для компонентів діелектричної проникності (x , y та z), навіть якщо всі матеріали є ізотропними.

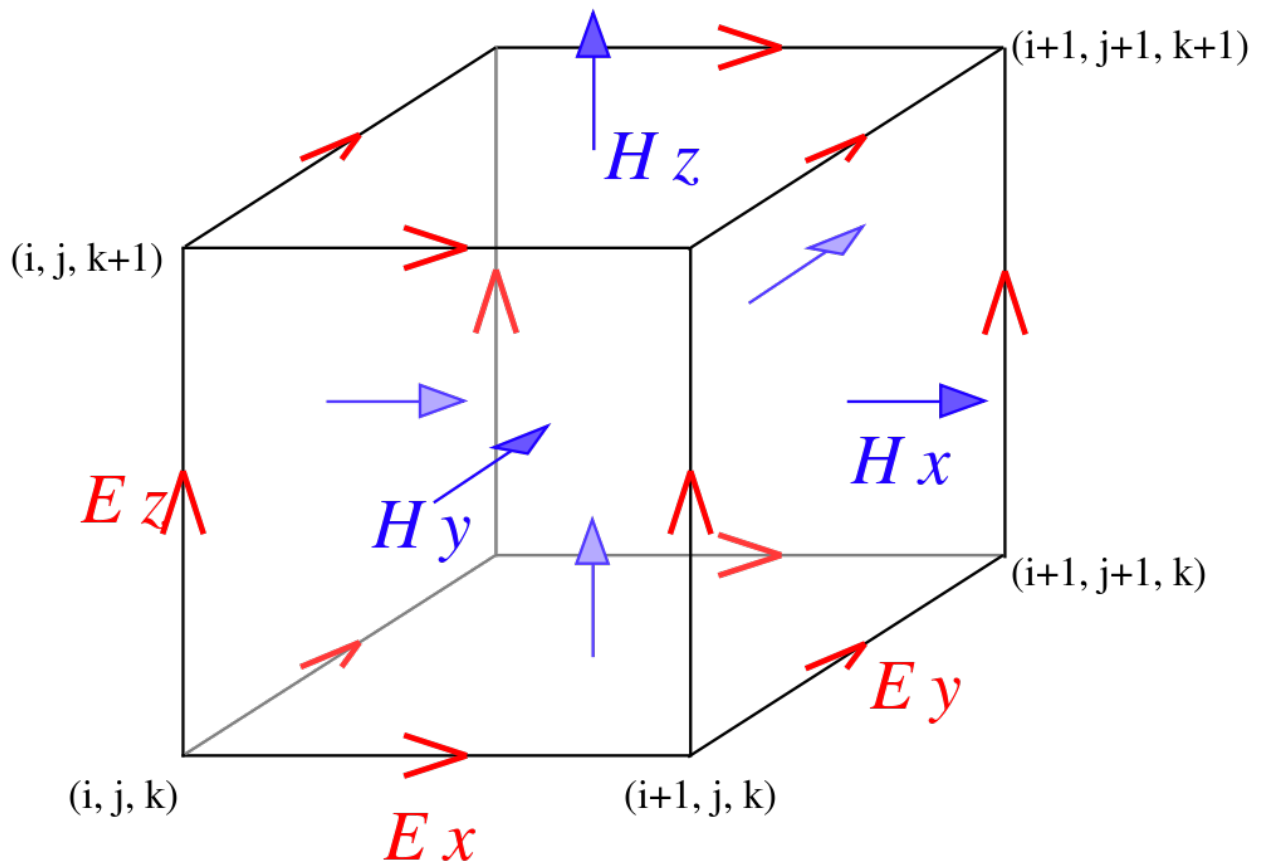


Рисунок 2.7. – Поля в комірці сітки FDTD, саме такі комірки становлять просторову тривимірну сітку Йі

Ми можемо обчислити багато інших величин з проникності, електричного поля та магнітного поля. Ми можемо розрахувати відбиття, проходження матеріалу, розсіювання на перерізі, поглинання та багато іншого. Наприклад, вектор Пойнтінга, який часто називають P , можна обчислити за допомогою векторного добутку E на H . Це дозволяє нам обчислити потужність, що перетинає задану поверхню.

Аналогічна сітка використовується при розв'язку задач гідродинаміки (для тиску і поля швидкості).

Як в будь-якому іншому різницевому методі, в FDTD існує проблема неточного відображення границі тіла на обчислювальну сітку. Будь-яка крива поверхня, яка розділяє з'єднані середовища і геометрично неузгоджені з сіткою, буде спотворюватись ефектом "ступінчастого наближення". Для вирішення даної

проблеми можна використовувати додаткову сітку з великою роздільною здатністю в тих областях простору, де розташовані тіла зі складною геометричною структурою. Також можна видозмінювати різницеві рівняння у вузлах сітки, які знаходяться поблизу границі між сусідніми тілами. Менш затратним методом є введення ефективної діелектричної проникності поблизу границі між тілами.

Порядок розрахунку відбувається так: задається область, в якій проводяться розрахунки, розподільна здатність сітки і граничні умови. Граничні умови можуть бути поглинаючими чи періодичними. Останні застосовуються для моделювання нормального падіння плоскої хвилі на періодичну структуру.

Всередині області, в якій рахують поміщають матеріальні тіла зі заданими оптичними властивостями (діелектрична проникність і магнітна провідність)

Задається джерело. Найпростіший спосіб задання джерела полягає в заданні часової залежності щільності струму J в рівнянні Ампера. Такий тип джерела зазвичай використовується при моделюванні диполей. Для генерації плоскої хвилі більш зручний другий тип джерела, який реалізується за допомогою методу повного і розсіяного поля (Total Field / Scattered Field).

Джерело генерує кінцеву в часі електромагнітну хвилю, спектральний склад якої має покривати діапазон частот, які нас цікавлять. Далі, хвиля падає на тіла, перерозсіюється на них та, при наявності поглинаючих граничних умов, через якийсь час виходить з області, в якій проводяться розрахунки. Історія розповсюдження хвилі зберігається.

За допомогою перетворення Фур'є записані значення полів переводяться в частотне представлення. Далі, обробляючи їх (наприклад, інтегруючи потік енергії поля через будь-яку поверхню), можна отримати оптичні характеристики даної структури тіл. Використовуючи метод перетворення ближнього поля в далеке (Near to Far Transformation), можна отримати значення полів за межами області, в якій проводяться розрахунки, на підставі еволюції поля всередині цієї області.

Доступні типи джерел випромінювання включають основні джерела, такі як плоска хвиля, пучок Гауса (Рис.2.9.) та диполь, а також більш досконалі джерела. Тип джерела, який слід вибрати для моделювання, буде залежати від конструкції,

яку ви хочете копіювати, або результату, який ви хочете отримати. Наприклад, лазерне джерело з профілем Гаусса, що використовується в експерименті, може бути представлене гауссовим джерелом. Точкове джерело можна представити, використовуючи дипольні джерела.

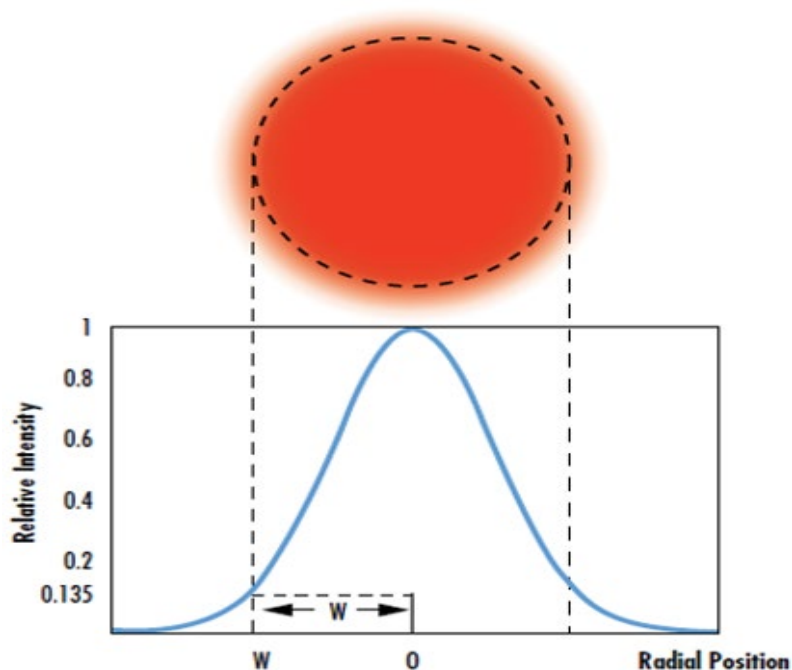


Рисунок 2.8. – Інтенсивність випромінювання розподілена згідно закону Гауса

Як і будь-який інший чисельний метод, FDTD має свої переваги і недоліки
Переваги:

- FDTD - це простий і інтуїтивно зрозумілий метод.
- Оскільки FDTD працює в часовій області, він дозволяє отримати результат для широкого діапазону довжин хвиль за один розрахунок. Це може бути корисно при вирішенні завдань, в яких невідомі резонансні частоти, або в разі моделювання широкосмугових сигналів.
- FDTD дозволяє створювати анімовані зображення поширення хвилі в об'ємі, яке моделюється.
- FDTD зручний при описі анізотропних, дисперсних та нелінійних середовищ.

- Метод дозволяє безпосередньо моделювати крайові ефекти і ефекти екранування, причому поля всередині і поза екраном можуть бути розраховані як напряму, так і ні.

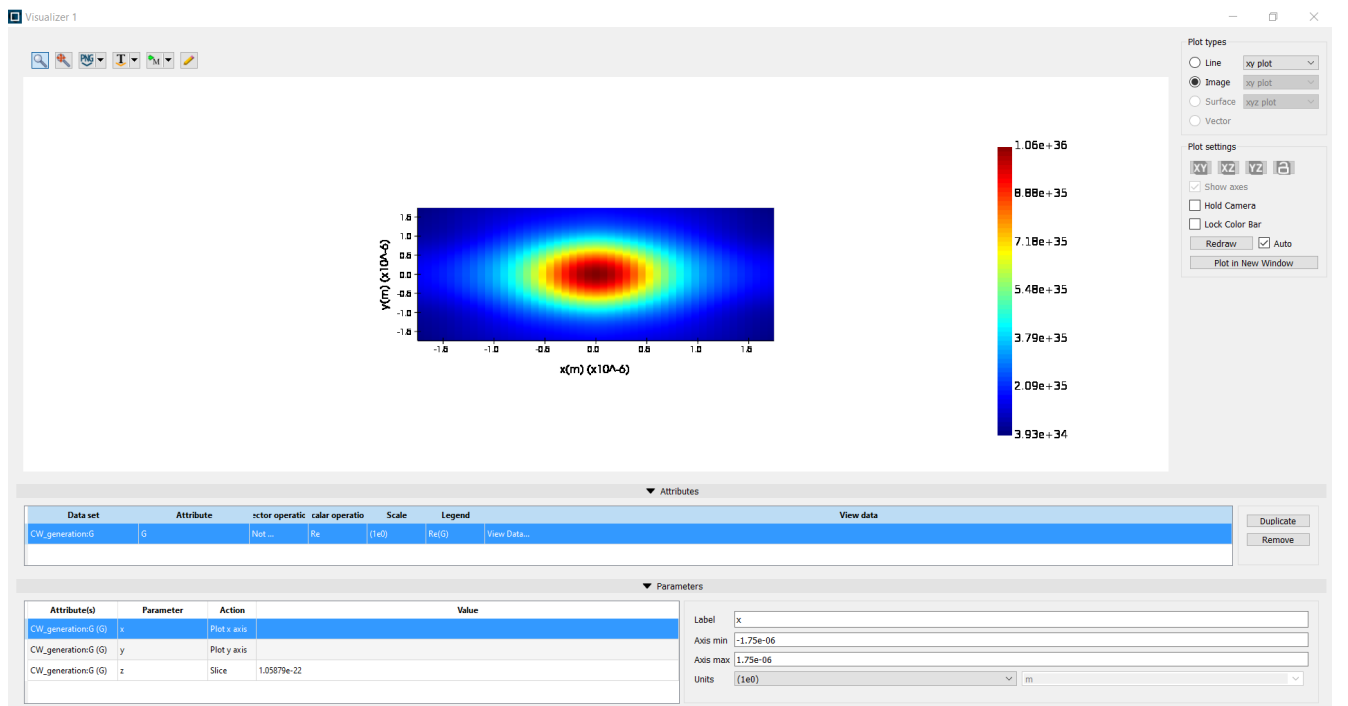
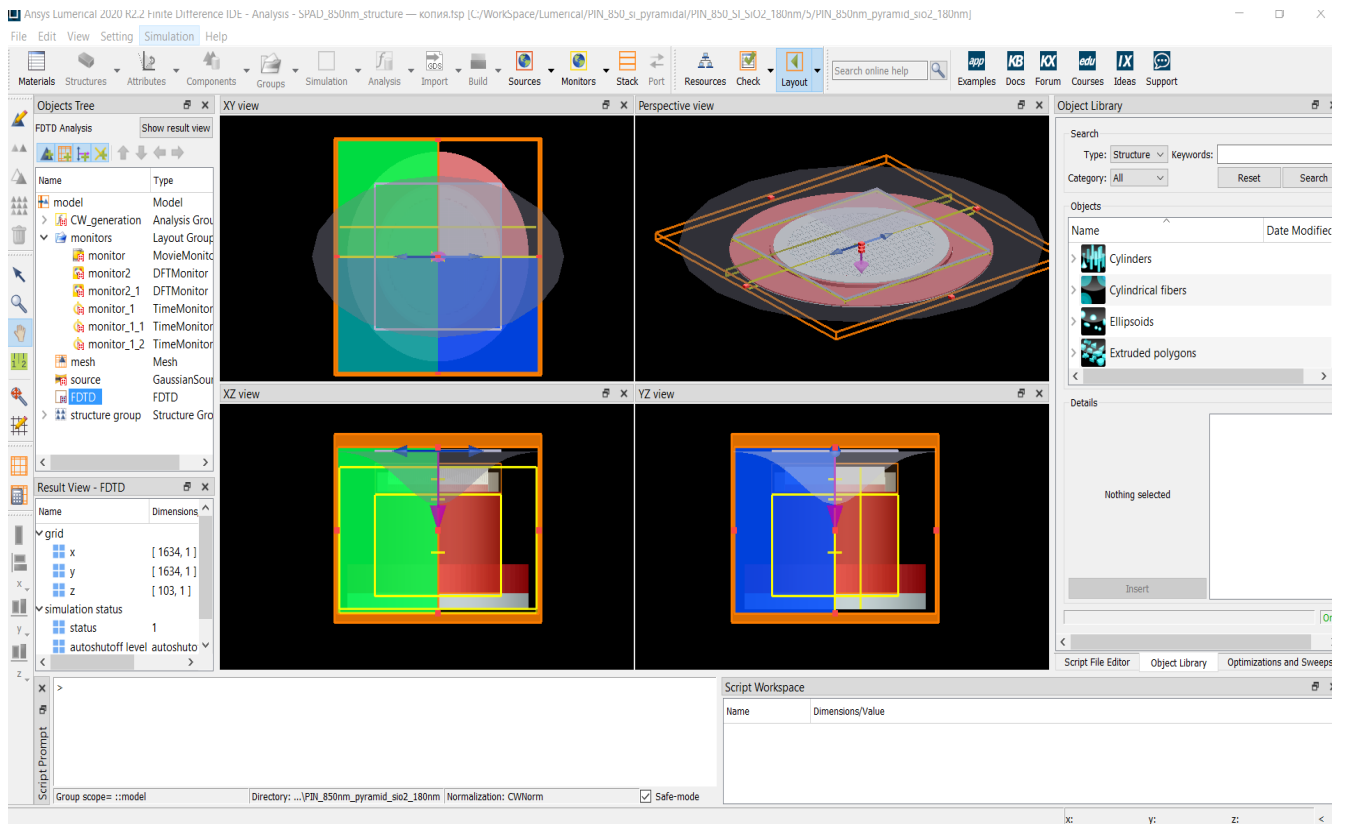


Рисунок 2.9. – Вид робочих вікон програми Lumerical FDTD

Недоліки:

- Величина кроку дискретизації по простору повинна бути значно менше досліджуваних довжин хвиль і типових розмірів досліджуваної структури. У деяких випадках (інверсні опади з маленькими перегородками між кульками) це може потребувати сіток з маленьким кроком, що означає великі витрати пам'яті і великий час розрахунку.
- FDTD розраховує поля всередині розрахункової області. Якщо потрібно знайти поле на великій відстані від джерела, то необхідне збільшення області, в якій проводяться розрахунки, і часу розрахунку. Існують модифікації методу для знаходження поля на відстані, але вони вимагають попередньої обробки.

Представлений інструмент доволі потужний і дає значний приріст в швидкості розрахунків, аналізу та прототипування мікроелектронних пристроїв та систем тому вважаю, що використання програми необхідне. На сьогоднішній день мікроелектронна галузь, як ніколи, дорога, тому необхідно використовувати всі можливості для мінімізації витрат.

Висновки до розділу:

Автор провів літературний огляд основних технологічних процесів виготовлення фотодіоду з якого можна здійснити наступні висновки. Перед побудовою технологічного маршруту необхідно провести моделювання електрофізичних характеристик в програмах TRIM, ISE TCAD та фотооптичних в Lumerical FDTD для визначення оптимальних параметрів. Призначення хімічно-механічного полірування та хімічно-динамічного для усунення зовнішніх фізичних дефектів та обезжирити кристал перед імплантацією домішкових елементів. Імплантацію найкраще проводити в багатоступеневому режимі для найбільш рівномірного розподілу і великої глибини залягання домішкових атомів. Після процесу імплантації необхідно провести відпал структури щоб усунути утворені точкові і структурні дефекти. Оскільки температура плавлення InSb доволі низька (525°C), а при високій температурі порушується стехіометрія матеріалу, відбувається сублімація елементів, утворюються оксиди, необхідно

використовувати низькотемпературний швидкий термічний відпал (RTA). Найбільша ефективність досягається при двохстадійному процесі відпалу. Для захисту поверхні використовується пасивуюче покриття нанесене методом хімічного осадження з газової фази з плазмовою активацією процесу. ВІМС дає можливість перевірити правильність технологічного процесу, надаючи дані про розподіл хімічних елементів у структурі фотодіода.

3. АНАЛІЗ СТОРОННІХ ФОТОДІОДІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ

3.1. Аналіз фотодіодів стороннього виготовлення

Технологія виготовлення фотодіодів на основі InSb не нова і використовується в різних країнах для схожих цілей (детектування ІЧ випромінювання в діапазоні 3-5мкм). Тому окрім огляду літератури ми провели аналіз фотодіодів виготовлених в інших країнах, а саме польського, китайського та радянського.

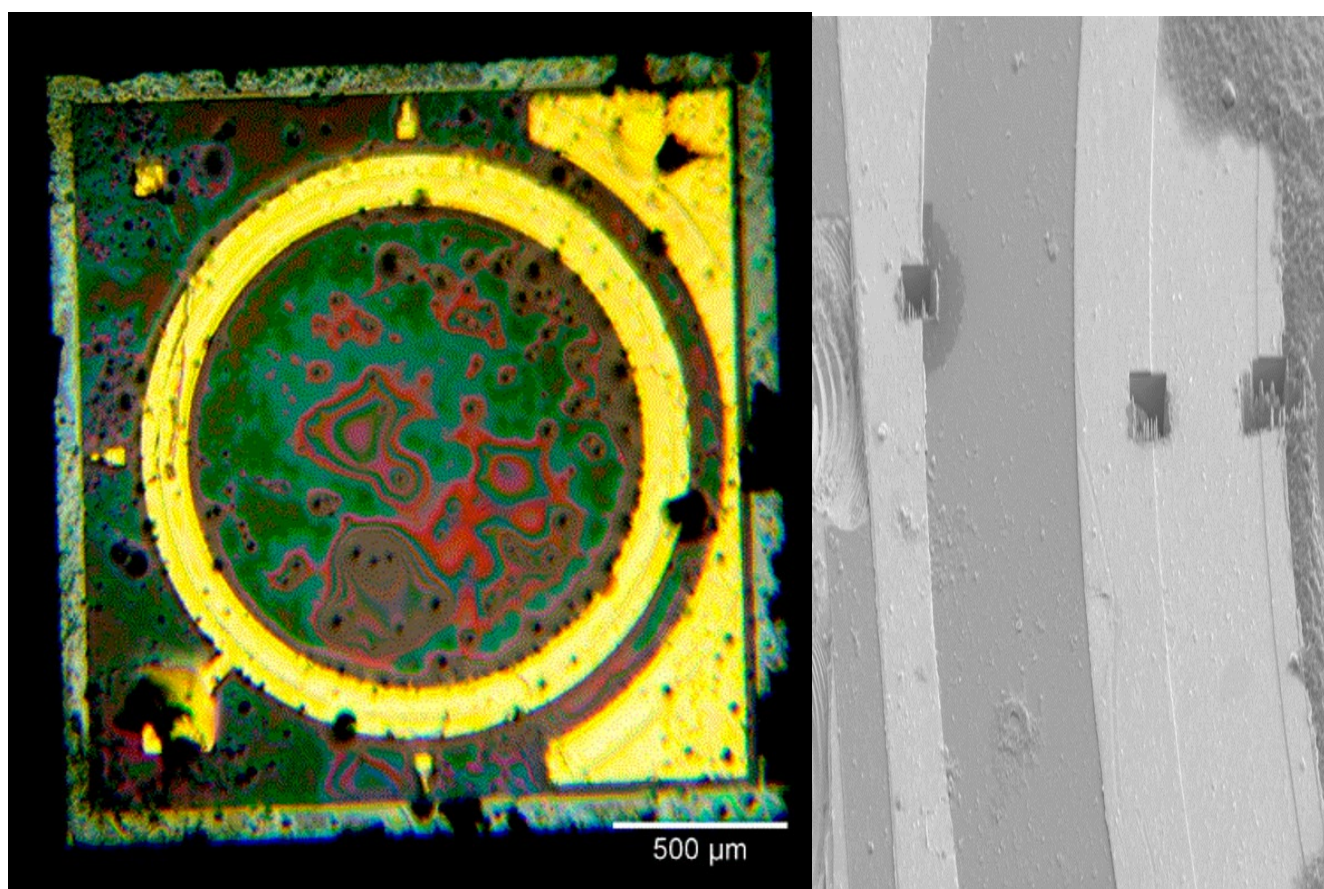


Рисунок 3.1. – Фотографії польського фотодіода

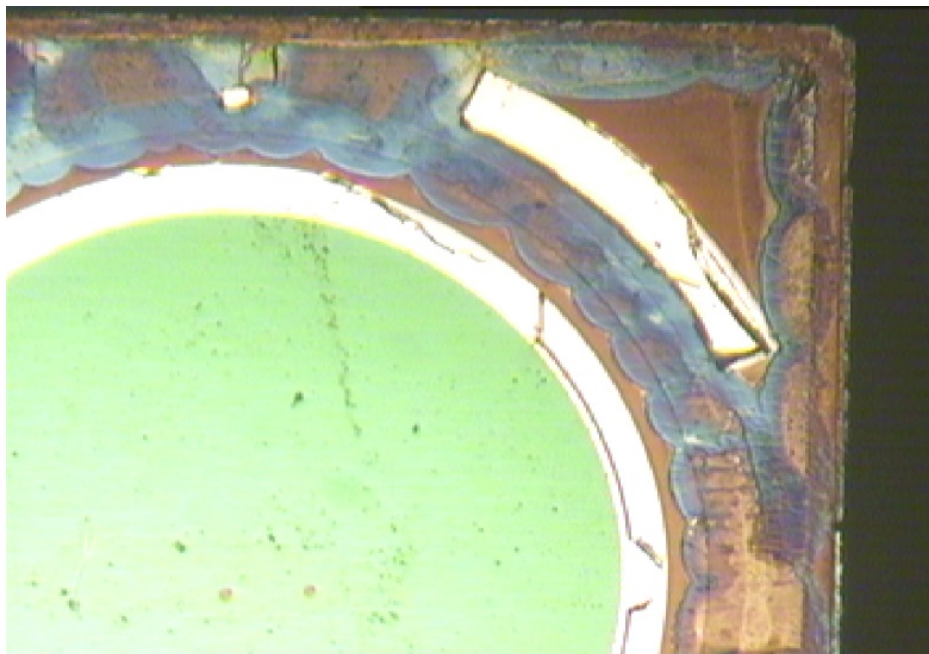


Рисунок 3.2. – Фрагмент радянського фотодіода ФД-3645 після УЗ очистки в Н₂О

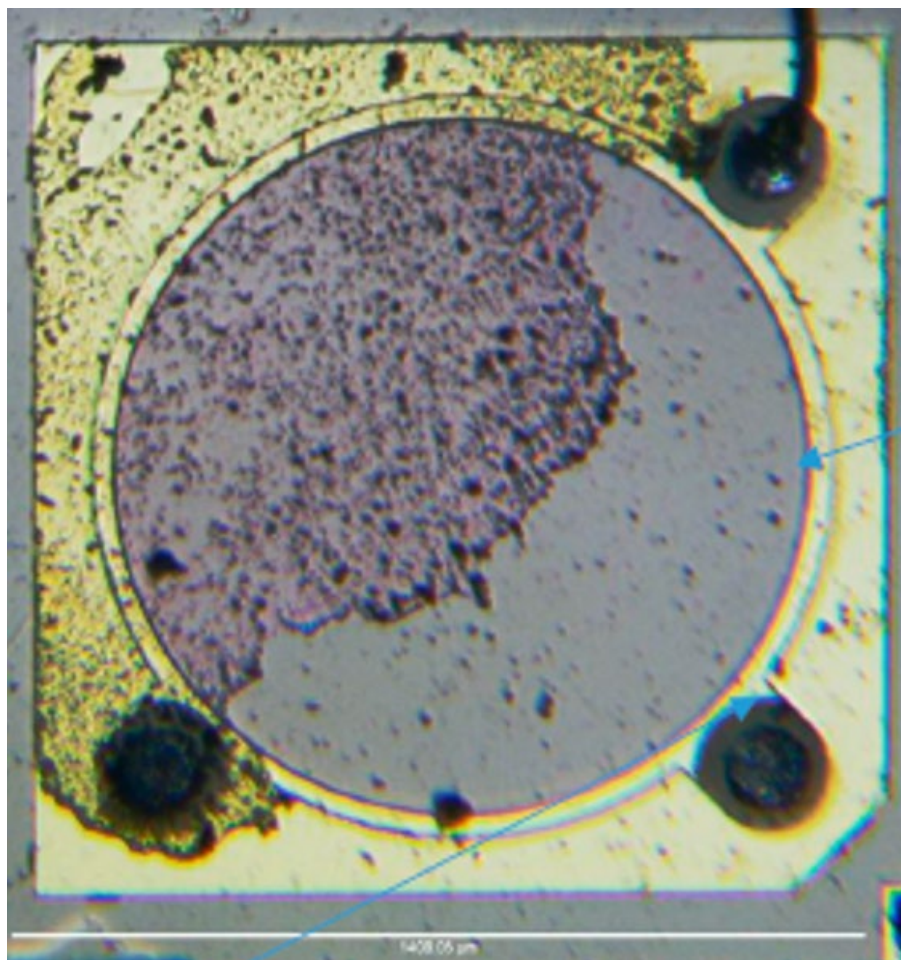


Рисунок 3.3. – Фотографії китайського фотодіода

Як бачимо у фотодіодах спостерігається порушення, а саме відшарування поверхневих шарів, точкові вкраплення елементів. Оскільки вони характерні для різних діодів це значить, що вони мають схожий технологічний маршрут. Наслідком таких порушень є зменшення інтегральної чутливості, утворення поверхневого надлишкового заряду, що впливатиме на ВАХ кінцевого продукту. Щоб не допустити подібної ситуації з нашим фотодіодом, виникла необхідність провести аналіз технологічних шарів сторонніх фотодіодів задля розуміння дефектних технологічних маршрутів та відсутності подібних наслідків. Використовували установки для ВІМС, РФЕС та атомно-силовий мікроскоп. Оскільки методи ВІМС є руйнівними для поверхні їх виконували вкінці.

У всіх фотодіодах використовувалась імплантація берилію рис.3.4. для утворення p^+ області також в китайському фотодіоді з меза-структурою рис.3.5 на невелику глибину імплантували Mg під контактну область для отримання кращих параметрів омичного контакту.

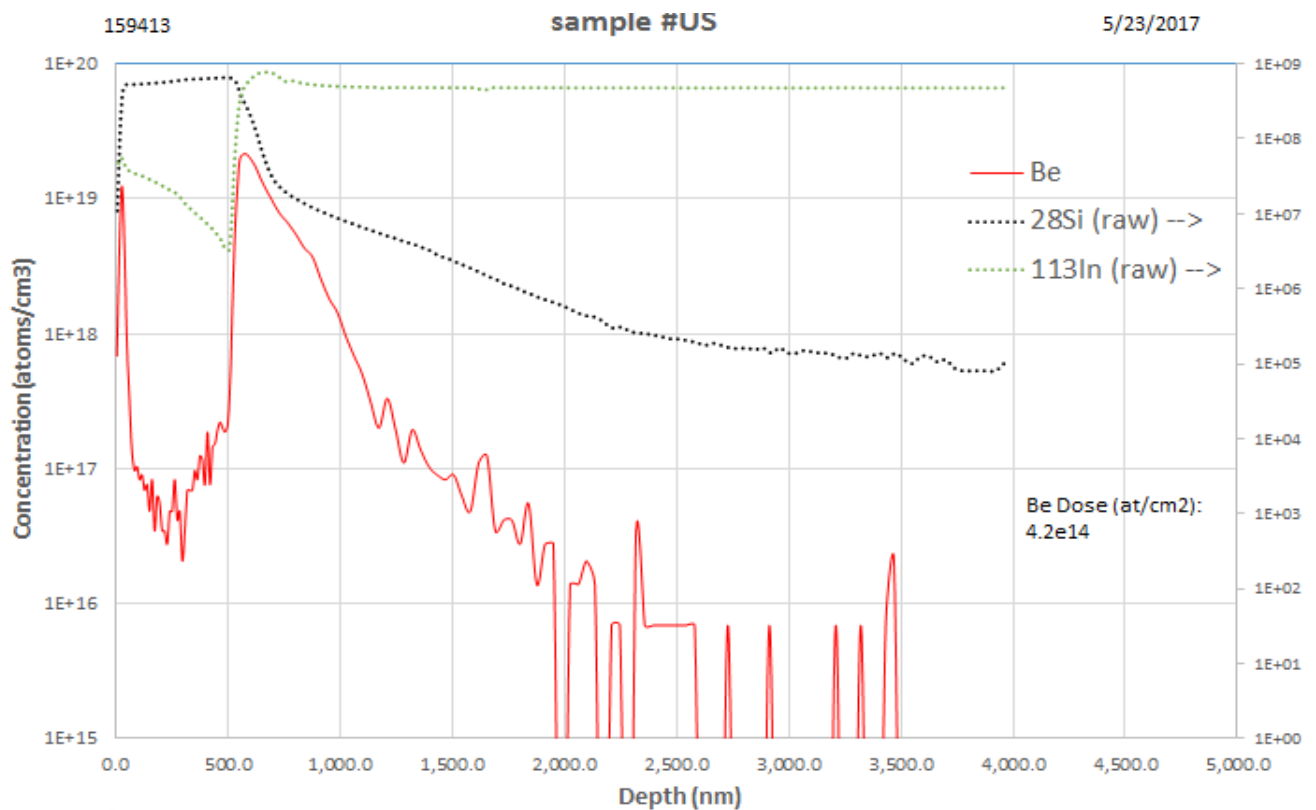


Рисунок 3.4. – Профіль розподілу Be в радянському фотодіоді

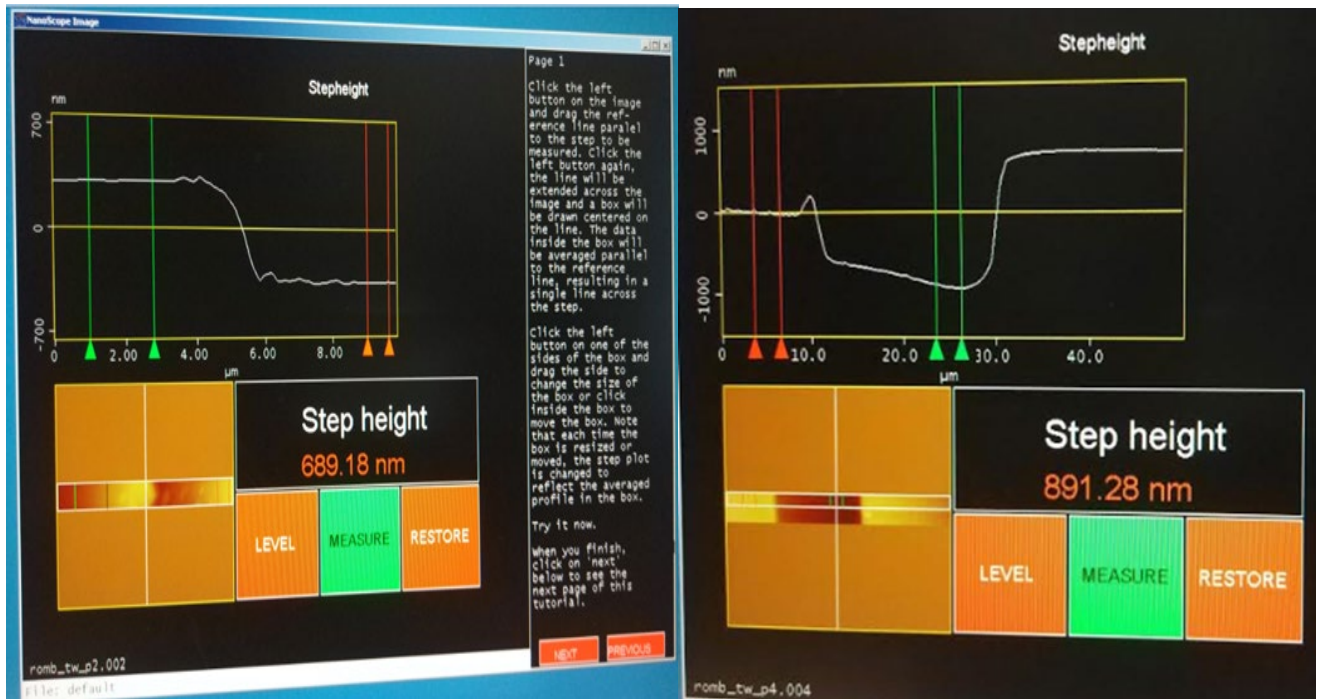


Рисунок 3.5. – Профілі китайського фотодіода отримані на атомно-силовому мікроскопі

Результати проведеного реверс-інжинірингу фотодіодів наведені в таблиці 3. Оскільки відшаровування і скраплення відбуваються на поверхні пластини тому потрібно досліджувати саме поверхневі шари.

Таблиця 3. Товщини технологічних шарів фотодіодів

Технологічний шар	Польський (планарна структура)	Радянський (планарна структура)	Китайський (меза-структура з імплантацією Mg під контакт)
Анодний окисел	66nm	48nm	160nm
SiOx	420nm	510nm	920nm
Cr	7nm	1,9nm	4nm
Au	560nm	770nm	2200nm

Отримані відшарування можна пояснити наступ чином. Коли чиста підкладка InSb потрапляє на повітря, її поверхня легко окислюється і швидко утворюється шар власних оксидів товщиною в кілька нанометрів. Принципова схема представлена на рис. 3.1.

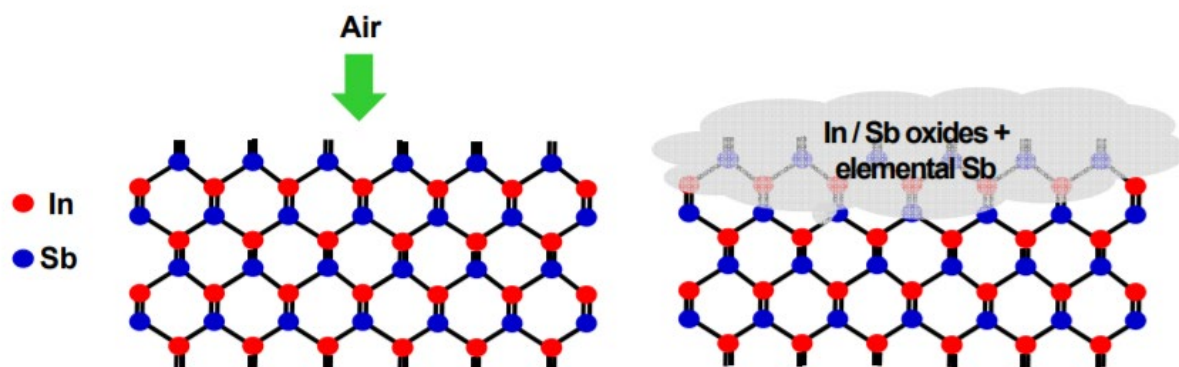
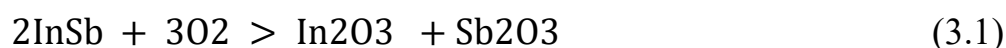
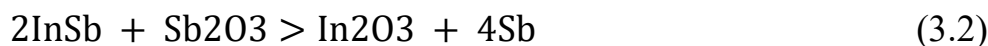


Рисунок 3.6. – Схематична ілюстрація процесу утворення власних оксидів InSb під впливом повітря

Окислення InSb починається з розриву зв'язків поверхневих атомів і подальшої перебудова після початкового утворення оксидного шару. Кисень з повітря дифундує на поверхню InSb, реагуючи з атомами In і Sb, утворюючи In оксид (In_2O_3) та оксид Sb (Sb_2O_3) відповідно. Він представлений в рівнянні 3.1.



Цей процес утворення власного оксиду є нерівноважним процесом. Подальша поверхнева реакція протікала, як показано в рівнянні 3.2.



Утворений Sb_2O_3 реагує з більшою кількістю InSb, утворюючи додаткові молекули In_2O_3 та кристалічного Sb. Саме ці молекули викликають відшарування поверхневих шарів оскільки розміщені нерівномірно на пластині. Термодинамічно In_2O_3 та кристалічний Sb є єдиними стабільними фазами після

окислення InSb [16]. Рівняння 3.1 і 3.2 є спонтанними реакціями, які виникають навіть при кімнатній температурі.

Згідно стандартного технологічного маршруту, який використовували при виготовленні розглянутих вище фотодіодів, для захисту поверхні між операціями, зменшення поверхневих струмів у місцях виходу р-n-переходу на поверхню та відсутності контакту InSb з пасивуючим покриттям кремній оксиду використовують анодне окислення. Щоб усунути можливість проходження процесів описаних вище, ми вирішили дослідити виключення шару анодного оксиду із кінцевого пристрою та заміни пасивуючого покриття на силіцій нітрид, який є схожий по своїм властивостям із силіцій оксидом однак не створює паразитні оксиди індію та антимоніду, залишкові поверхневі заряди та провідні оксиди.

Утворення скраплень In, які виникають на поверхні рис.3.7. пояснюється наступним чином.

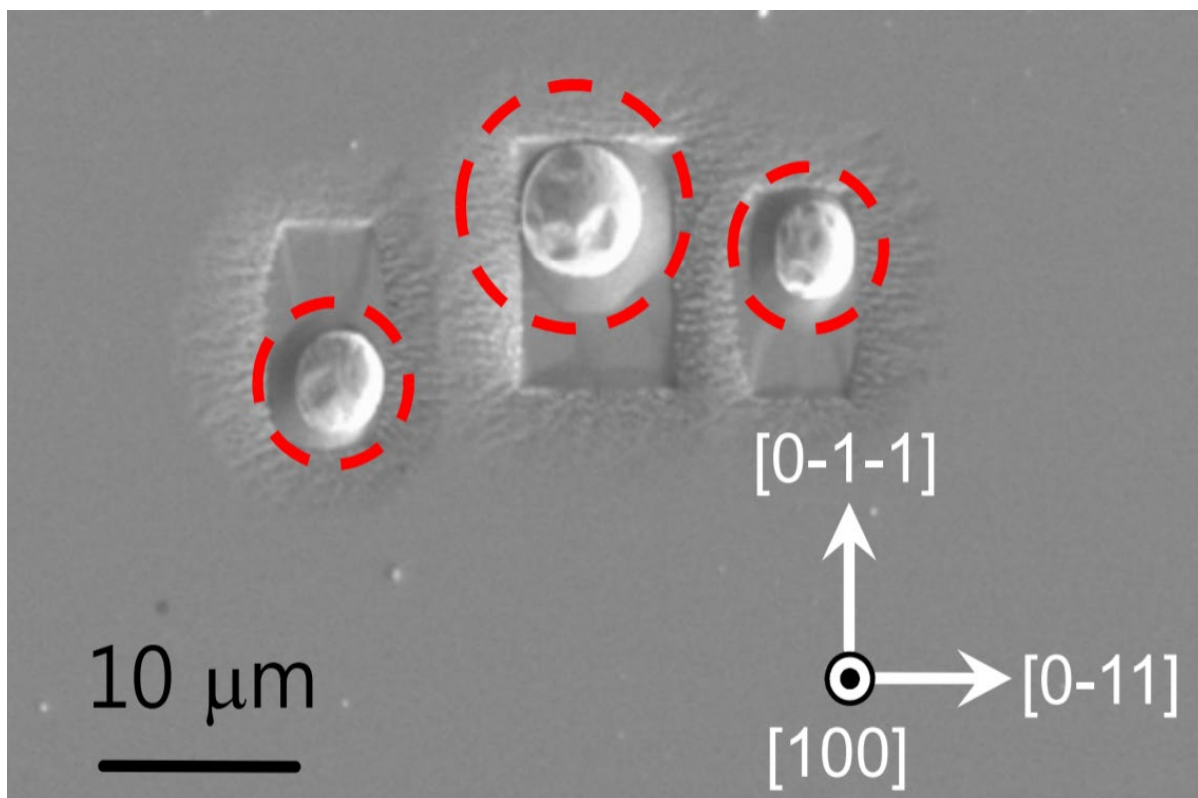


Рисунок 3.7. – Скраплення In на поверхні, картинка отримана методом SEM[3]

Зі збільшенням температури під час термічного відпалу власні оксиди десорбувались із-за прикладеної теплової енергії. Власні оксиди десорбувались нерівномірно через нерівномірність власної товщини та, або бокової зміни стехіометрії оксидів. Sb десорбується з поверхні InSb швидше ніж In оскільки, як описувалось вище, утворюється кристалічний одноелементний Sb та температура плавлення In_2O_3 доволі висока. В результаті утворювався надлишок In і мігрував на поверхню InSb, утворюючи краплі In. По краплях збираються один до одного і з часом більші зростають за рахунок менших рис.3.8. Завдяки тепловій енергії прямокутні ями травлення також утворювались в оточенні крапель In. Щоб уникнути утворень необхідно відпал проводити в безкисневому середовищі та не допускати утворень власних оксидів.

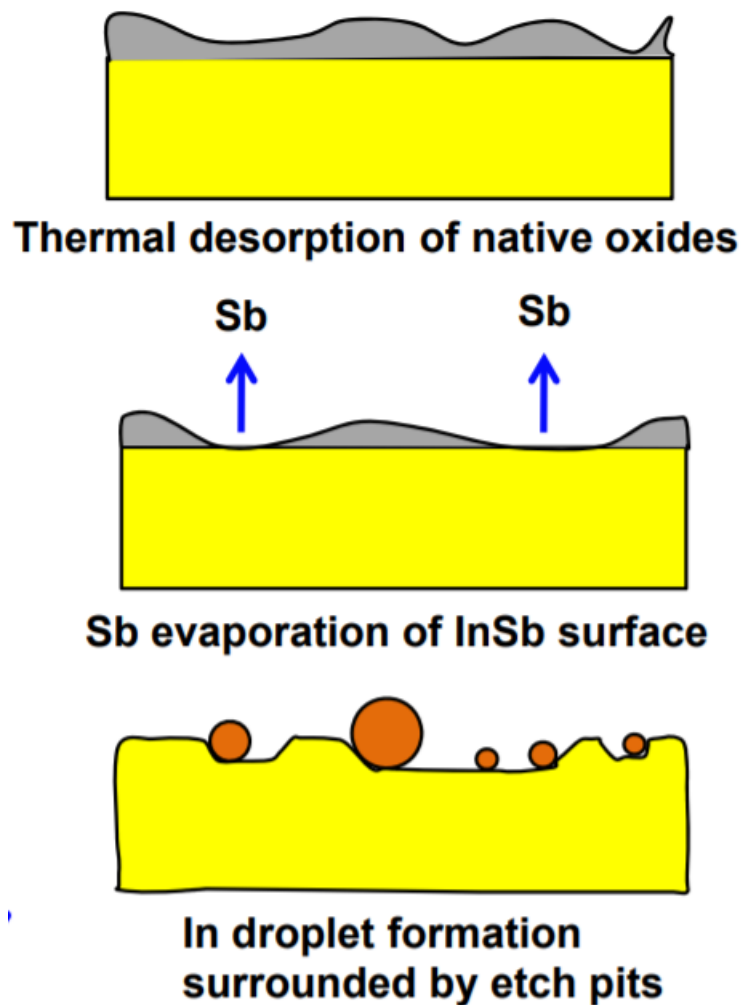


Рисунок 3.7. – Утворення скраплень In на поверхні

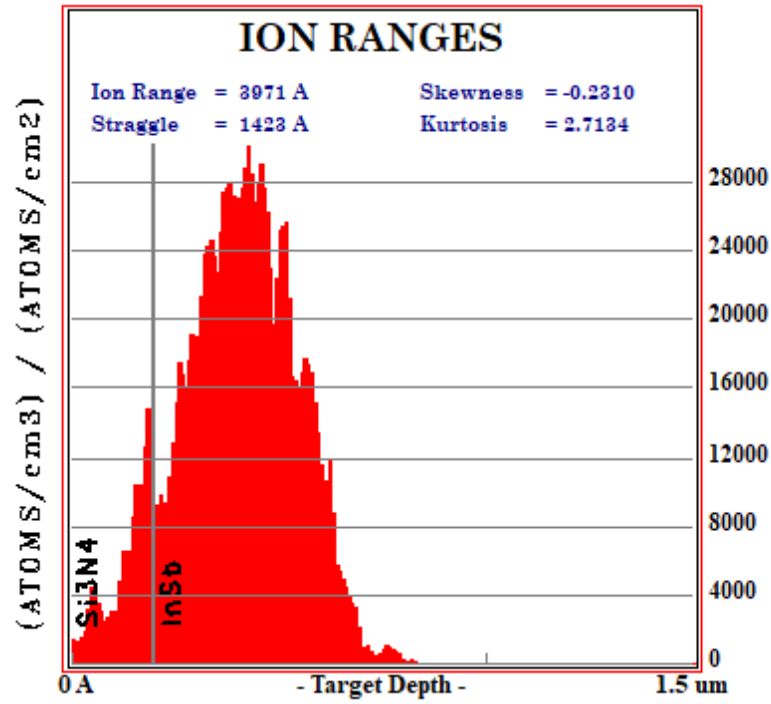
3.2. Моделювання параметрів виготовлення

3.2.1. Моделювання профілів розподілу домішки

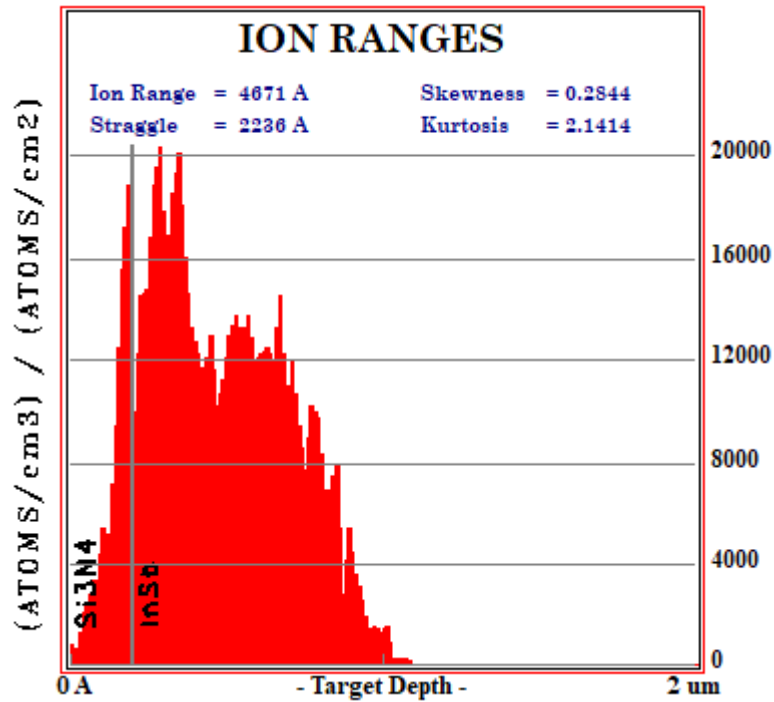
З стрімким розвитком обчислювальної техніки профілі імплантованої домішки для різних варіацій іон-мішень стало можливим розраховувати не тільки якісно але й кількісно. Найбільш використовується метод випадкових величин, названий Монте-Карло. Сутність методики обрахунку за Монте-Карло полягає в розіграші за допомогою генератора випадкових чисел важливих параметрів. В нашому випадку іонного легування такими параметрами є довжина вільного пробігу між зіткненнями для падаючого іона і його приблизна відстань перед зіткненням з атомом мішені імплантації. Інші параметрів, такі як щільність і склад мішені, товщина мішені, початкова енергія іона, атомні маси, енергія зміщення атомів мішені, задаються сталими значеннями на перших кроках реалізації програми. Програма простежує траєкторію руху кожного імплантованого іона, по черзі вирішуючи завдання про зіткнення заряджених частинок. При цьому відбувається реєстрація наступних параметрів: втрата енергії на шляху вільного пробігу, втрата енергії під час зіткнення з атомом мішені, кут відхилення від початкового напрямку. Після процес розігрується заново з врахуванням попередньої події зіткнення. Критерієм зупинки обрахунку зазвичай вважається умова: залишкова кінетична енергія імплантованого іона не перевищує енергію необхідну для зміщення атома мішені. На цьому етапі програма фіксує розміщення іона.

На сьогоднішній день широкої популярності набула комп'ютерна програма SRIM, яка якраз використовує метод Монте-Карло для розрахунку. На сьогоднішній день є кілька її версій, одна з яких використовується в даній роботі. Останні версії програми SRIM дають змогу отримувати інформацію не тільки про профіль розподілу впровадженої домішки, але й про розпиленні мішені, профілі розподілу вакансій і міжвузлових атомів. Для того, щоб отримати правильні параметри профіля розподілу легуваної домішки і точкових дефектів необхідно задати проходження великої серії випробувань, зазвичай рекомендується декілька тисяч.

Створення структури фотодіода з оптимальною глибиною залягання домішки потребує визначення параметрів іонної імплантації. Тому ми за допомогою програми SRIM провели моделювання профілів розподілу легованої домішки Be та встановили необхідні енергії та дози імплантації. На рисунках 3.8а та 3.8б приведено розраховані профілі розподілу домішки берилію в InSb підкладці із захисною плівкою Si₃N₄ при одностадійній та двохстадійній імплантації відповідно. На рис. 3.8а спостерігаємо, що при імплантації з одною енергією 150кеВ поблизу поверхні формується область з малою концентрацією імплантованої домішки. Це впливає на досконалість контактів і може призводити до збільшення зворотних струмів. Тому для забезпечення низького опору в контактних областях та створення р-n переходу в монокристалах InSb оптимальним методом є використання двохстадійної імплантації іонів берилію, моделювання зображено на рис.3.8б. При більшій енергії доза легування визначається достатньою для забезпечення утворення р-n переходу, з найменшою концентрацією дефектів в області просторового заряду. Також для зменшення концентрації дефектів у структурі пластини використовується пасивуючий тонкий шар, з його використанням більша частина дефектів залишаються якраз таки в цьому пасивуючому шарі, що можемо спостерігати на рис.3.9. Спостерігаємо, що максимум розподілу Be при двохстадійній імплантації для енергії 45 кеВ знаходиться на глибині ~ 300 нм, а друга стадія імплантація з енергією 120 кеВ призводить до появи другого максимуму на глибині 650 нм. Також взагалі профіль розподілу виглядає рівномірним в порівнянні з одностадійним процесом.



a



б

Рисунок 3.8. – Профілі розподілу Be при одностадійній а) та двохстадійній б) імплантації

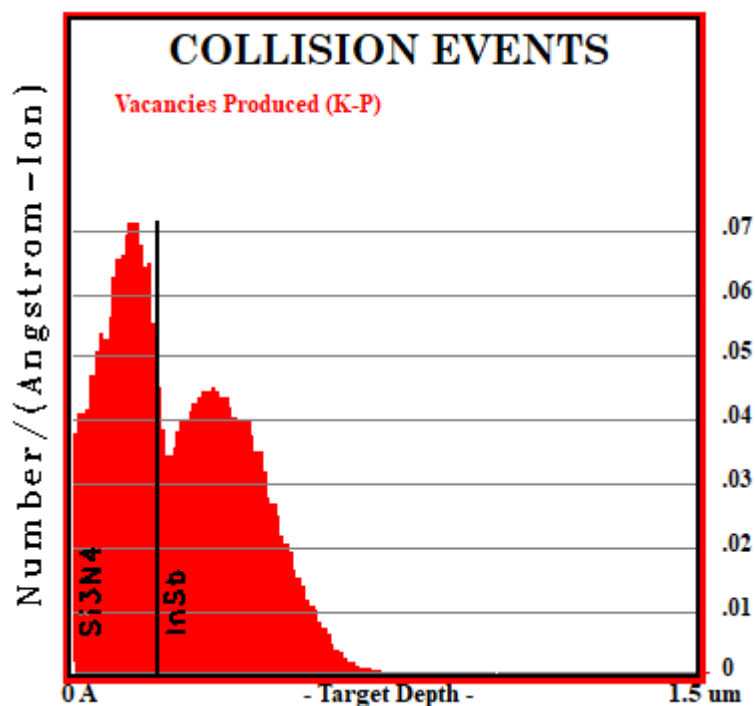
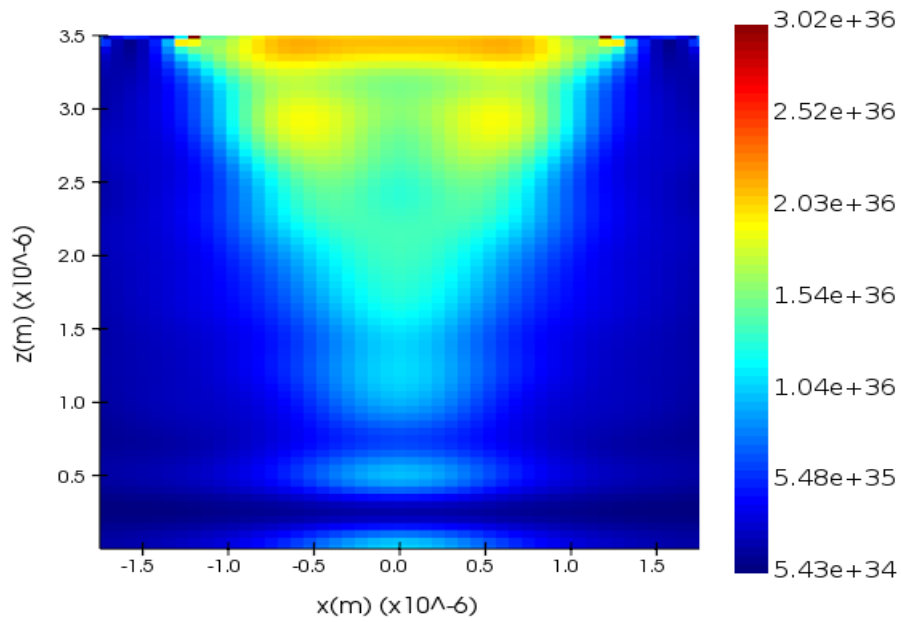


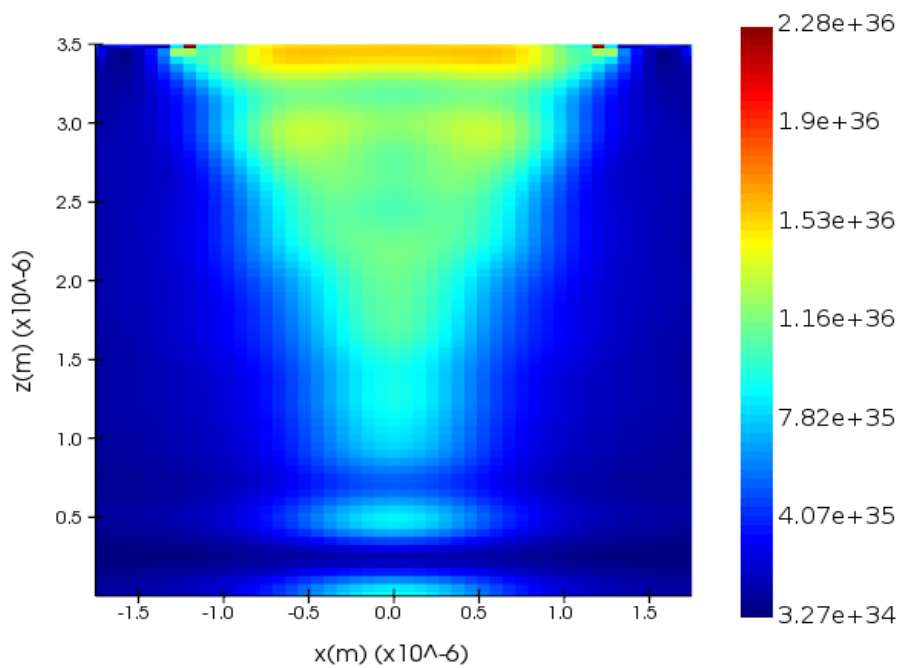
Рисунок 3.9. – Профілі розподілу вакансійних дефектів з використанням пасивуючого покриття

3.2.2. Моделювання в Lumerical

В цьому розділі ми моделювали вплив випромінювання на швидкість генерації утворення електрон-діркових пар в залежності від виду пасивуючого покриття. Оскільки як зазначалось вище нам необхідно замінити кінцеву пасивуючу структуру розглянутих фотодіодів (анодного оксиду і силіцій оксиду) на іншу. Згідно оглянутої літератури є декілька варіантів нанесення пасивації це силіцій оксид, силіцій нітрид та цинк сульфід. Оскільки оксиди створюють паразитні провідні області та власні оксиди антимоніду та індію, технологія нанесення цинк сульфиду недостатньо опрацьована та існують приклади ефективного осадження силіцій нітриду[19], без відшаровувань поверхневих шарів, вирішили провести моделювання оптичних характеристик матеріалу з різними пасивуючими шарами під впливом ГЧ випромінювання з довжиною хвилі 3 мкм.



а



б

Рисунок 3.10. – Розподіл концентрації згенерованих електрон-діркових пар під впливом випромінювання з покриттям силіцій оксиду а) та силіцій нітриду б) в перерізі структури.

В моделюванні рівня генерації електрон-діркових пар вважається, що кожен випущений фотон генерує одну електрон-діркову пару. Для того щоб зменшити час

розрахунків побудованої структури ми зменшили розмір елемента, що не впливає на оптичні властивості матеріалу, однак серйозно зменшить складність розрахунків. На рисунках 3.10а та 3.10б зображено розподіл концентрації згенерованих електрон-діркових пар у розрізі по центру фотодіода (p+ область) з пасивуючим покриттям силіцій оксиду та силіцій нітриду відповідно. Згідно з результатами моделювання можемо зазначити, що зміна пасивуючого покриття з силіцій оксиду на силіцій нітрид суттєво не впливає на концентрацію електрон-діркових пар.

Висновок до розділу:

Аналіз сторонніх фотодіодів виявив недоліки стандартного технологічного маршруту, а саме утворення анодного окислу викликає відшарування поверхневих технологічних шарів, скраплення індію та залишкові заряди на поверхні. Проведено огляд процесів, які приводять до таких наслідків. Запропоновано не використовувати АО в кінцевому пристрої за замінити пасивуюче покриття з силіцій оксиду на силіцій нітрид. Провівши моделювання в ПЗ SRIM профілів імплантації іонів берилію, ми визначили, що при одностадійній імплантації, при енергіях близько 100-150 кеВ, поблизу поверхні утворюється область з малою концентрацією легованої домішки, що може призводити до збільшення зворотних струмів. При нижчих енергіях залягання домішок не достатньо глибоке, що також є негативним оскільки зменшує ширину p-n переходу. Тому запропоновано проводити імплантацію у дві стадії з використанням пасивуючого покриття для зменшення кількості радіаційних дефектів в кінцевій структурі, оскільки згідно моделювання спостерігається, що дефекти значною мірою залишаються в захисному шарі. Моделювання в ПЗ Lumerical FDTD дало можливість порівняти вплив кінцевого пасивуючого покриття на концентрацію рівня генерації електрон-діркових пар. Результати моделювання показали, що вплив зміни матеріалу покриття несуттєвий, тому прийнято рішення використовувати для кінцевого пасивуючого покриття силіцій нітрид.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ, РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ

4.1. РФЕС (XPS) дослідження

В попередніх розділах ми зазначали, що на поверхні утворюються паразитні власні оксиди InSb. Повідомлялось, що процес утворення власних оксидів відбувається спонтанно навіть за кімнатної температури. Для того, щоб підтвердити власні припущення ми провели дослідження поверхні InSb за допомогою методу РФС. Для дослідження використовували установку РНІ 5500 XPS. Оскільки перший аналіз показав велику кількість забруднень карбоном та іншими матеріалами, задля впевненості в якості результатів ми вирішили не сильно протравити поверхню. Установка має можливість проводити травлення аргоном безпосередньо у робочій камері. Бомбардування аргоном відбувалось близько однієї хвилини. Результати дослідження зображено на рис.4.1

Дослідивши спектри РФС можемо зробити висновок, що на поверхні відбувається утворення плівки оксиду антимоніду. Оскільки відбувається зміщення піків енергії зв'язку електронів антимоніду, а саме $3d_{3/2}$ і $3d_{5/2}$ [22] згідно стандартної (537 та 528 відповідно) наведеної в посібнику до установки[23]. Правильне розміщення піків ми порівнювали з розміщенням карбону енергія зв'язку якого становить 285eV. Згідно проведеного аналізу наші припущення підтвердились тому було прийнято рішення проведення додаткового дослідження структури з АО методом ВІМС.

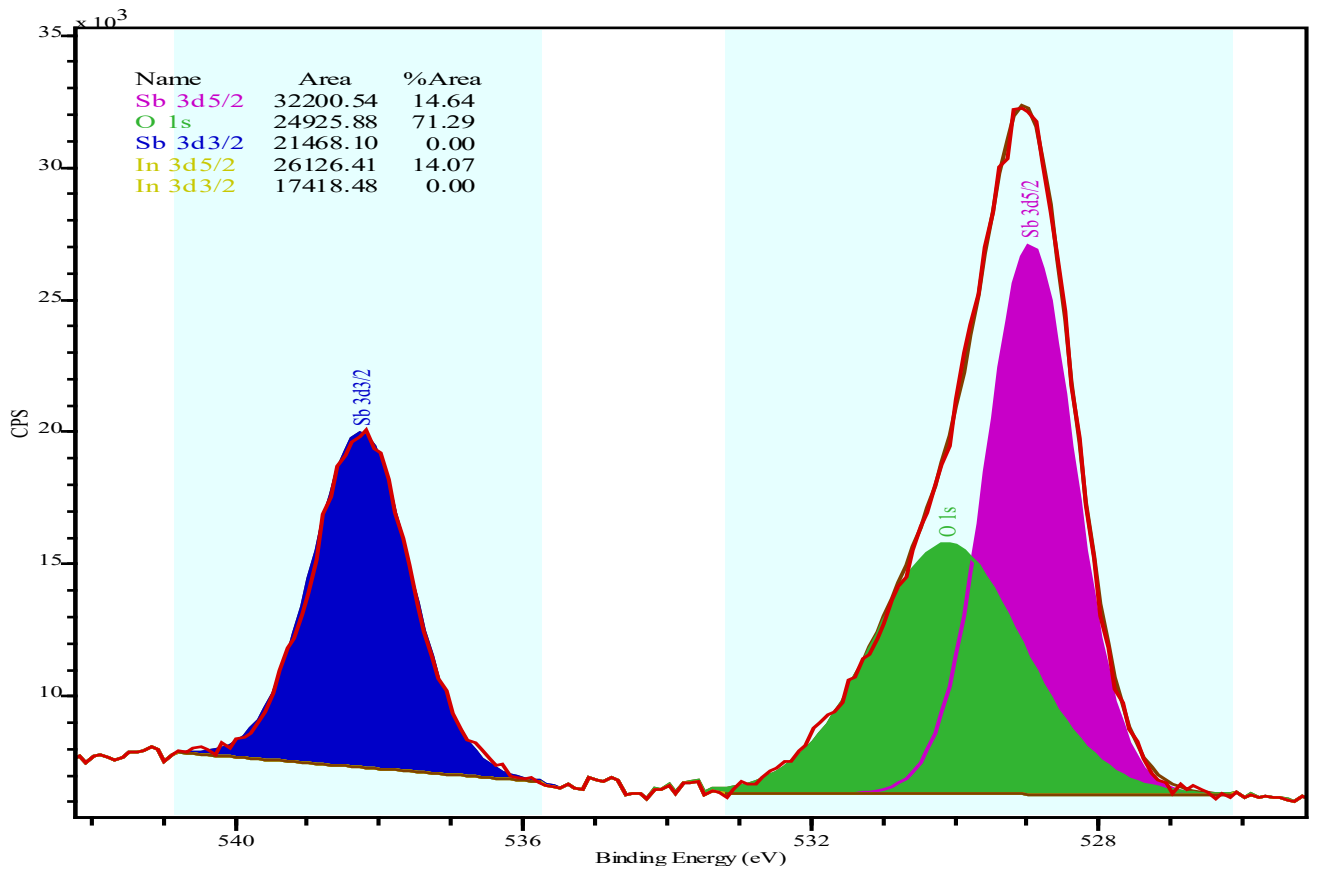
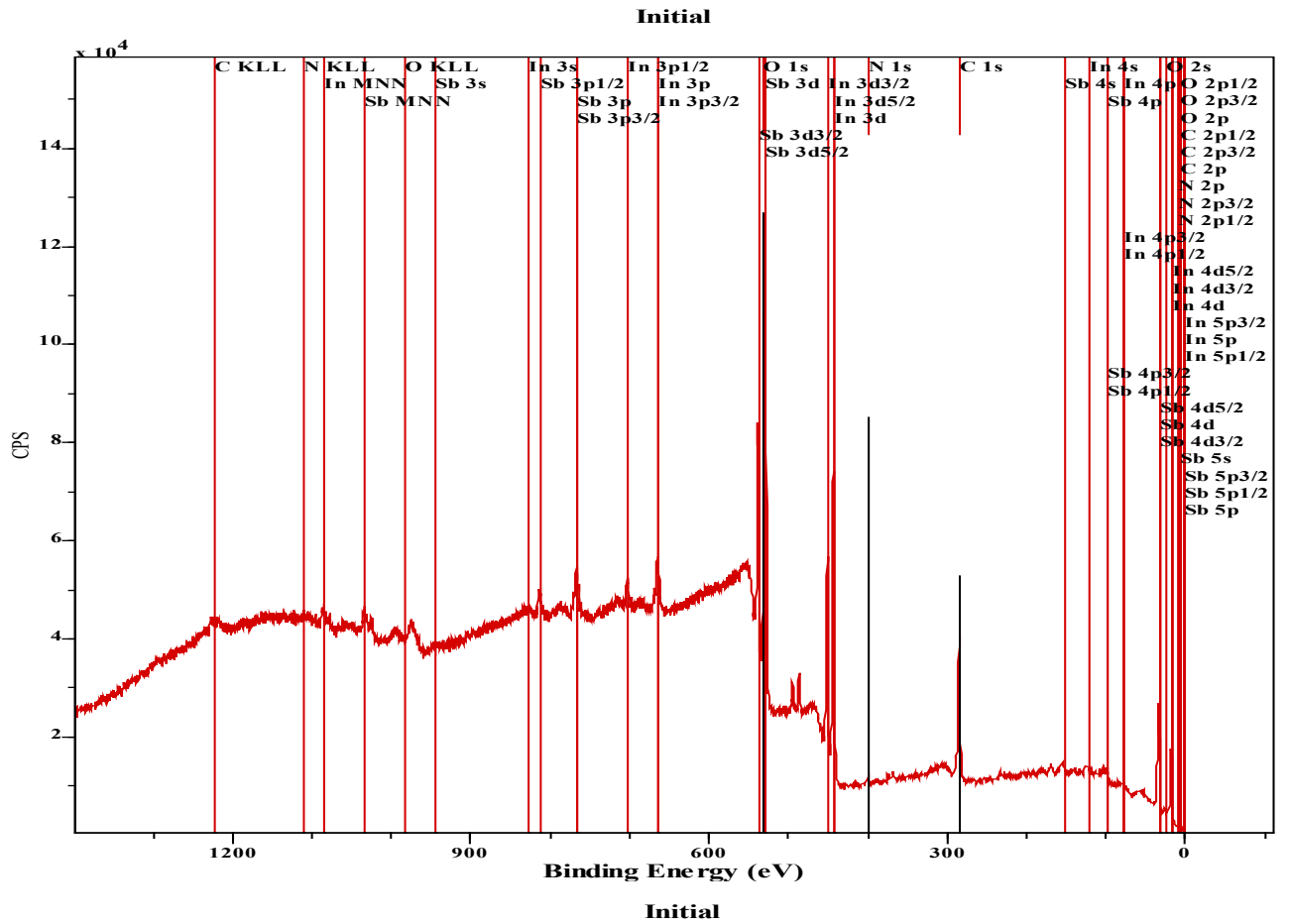


Рисунок 4.1. Оглядові РФС-спектри досліджуваної пластинки InSb

4.2. Дослідження методом ВІМС

4.2.1. Дослідження профілів розподілу берилію імпантованого в InSb

Стабільність роботи фотодіода на основі InSb забезпечується можливостями керування розподілу домішки в матеріалі. Найкращу якість та надійність контролю концентрації та дифузії домішки на всіх етапах виготовлення надає маспектрометричний метод, які дають можливість реєстрації профілів розподілу домішок з високою роздільною здатністю та чутливістю. В даній роботі ми визначали профілі розподілу домішки методом ВІМС.

Провівши моделювання та дослідження при різних концентраціях да дозах імпантації ми визначили оптимальні параметри. Для отримання рівномірної концентрації домішки, відсутності приповерхневої низьколегованої області, відсутності великої кількості радіаційних дефектів та областей пористої структури використовували двохстадійну імпантацію з енергіями 45 та 120кеВ та дозами $1 \cdot 10^{14}$ та $5 \cdot 10^{13}$ см⁻². Для більшої енергії імпантації доза вибирається такою, щоб забезпечити достатню концентрацію домішки для формування р-п переходу з найменшою кількістю утворених дефектів.

Отримані результати дослідження отримані методом ВІМС зображені на рис.4.1. Змодельовані профілі розподілу(рис.3.8б.) та експериментальні профілі хоча мають деякі невідповідності мають доволі гарне узгодження. Глибина залягання становить близько 1.4 мкм та форма розподілу доволі рівномірна до глибини 1 мкм. Тому можемо зазначити, що використання двохстадійної імпантації є ефективним методом утворення глибшого р-п переходу.

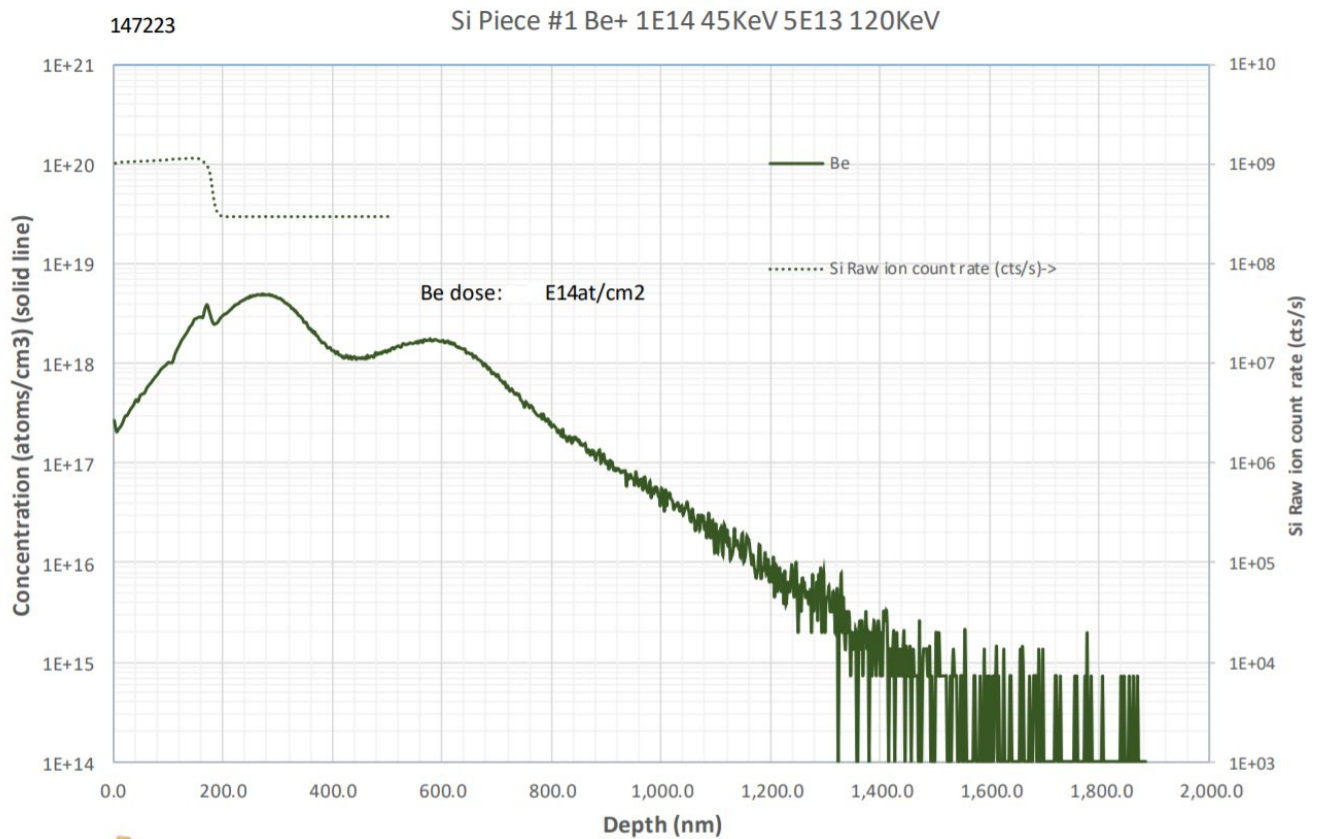
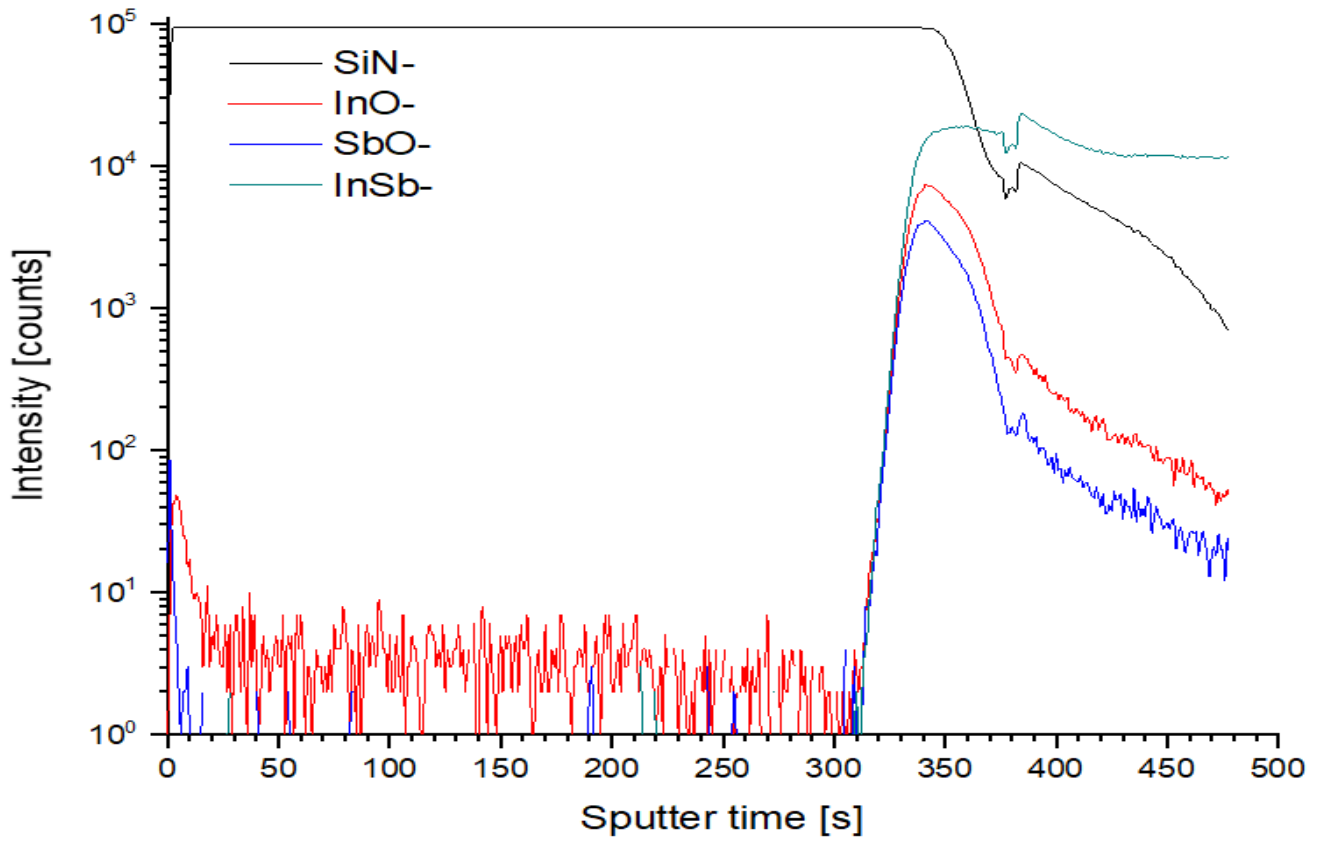


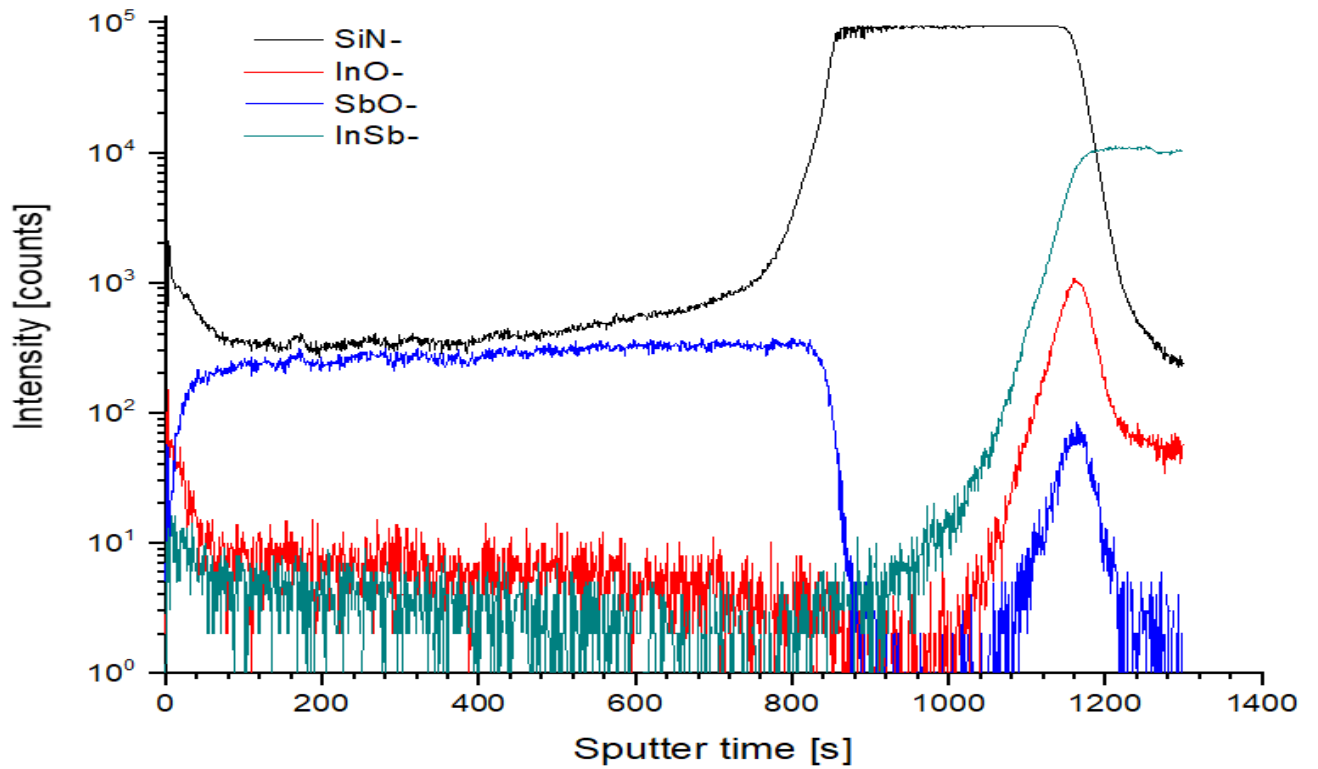
Рисунок 4.2. – Профіль розподілу домішки Be після імплантації з енергіями 45 та 120 кеВ отримані методом ВІМС

4.2.2. Дослідження впливу АО та пасивуючих покриттів

Для визначення впливу утворення АО та пасивуючих покриттів на утворення окислів, які спричиняють дефекти в кінцевій структурі фотодіода ми провели методом ВІМС дослідження. Аналізувались два зразки: пластина InSb з утвореним АО та нанесеним силіцій нітридом і готовий фотодіод без АО з покриттям силіцій нітриду та силіцій оксиду. Завдання полягало в детектуванні утворення паразитних власних оксидів в інтерфейсі InSb-Si₃N₄, утворення SiO₂ в об'ємі вирощеного силіцій нітриду та в інтерфейсі InSb-Si₃N₄.



a

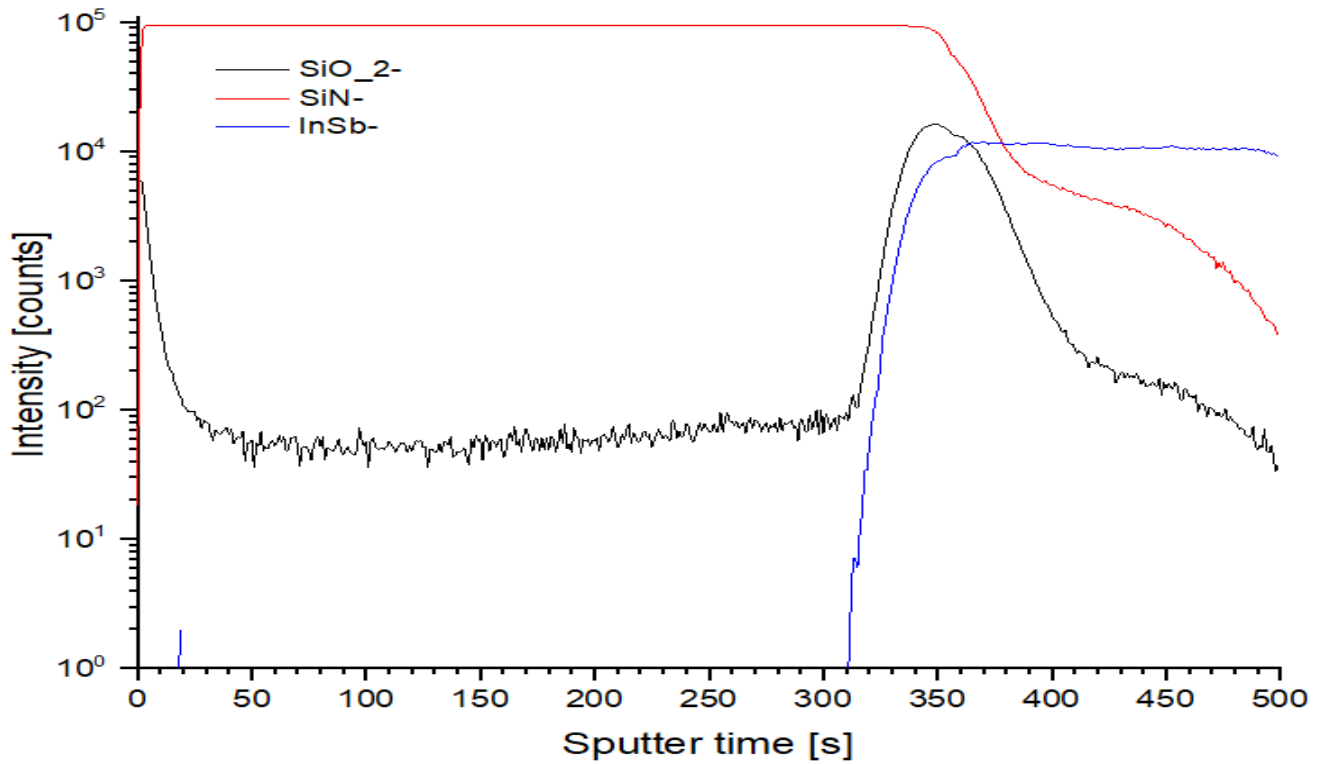


б

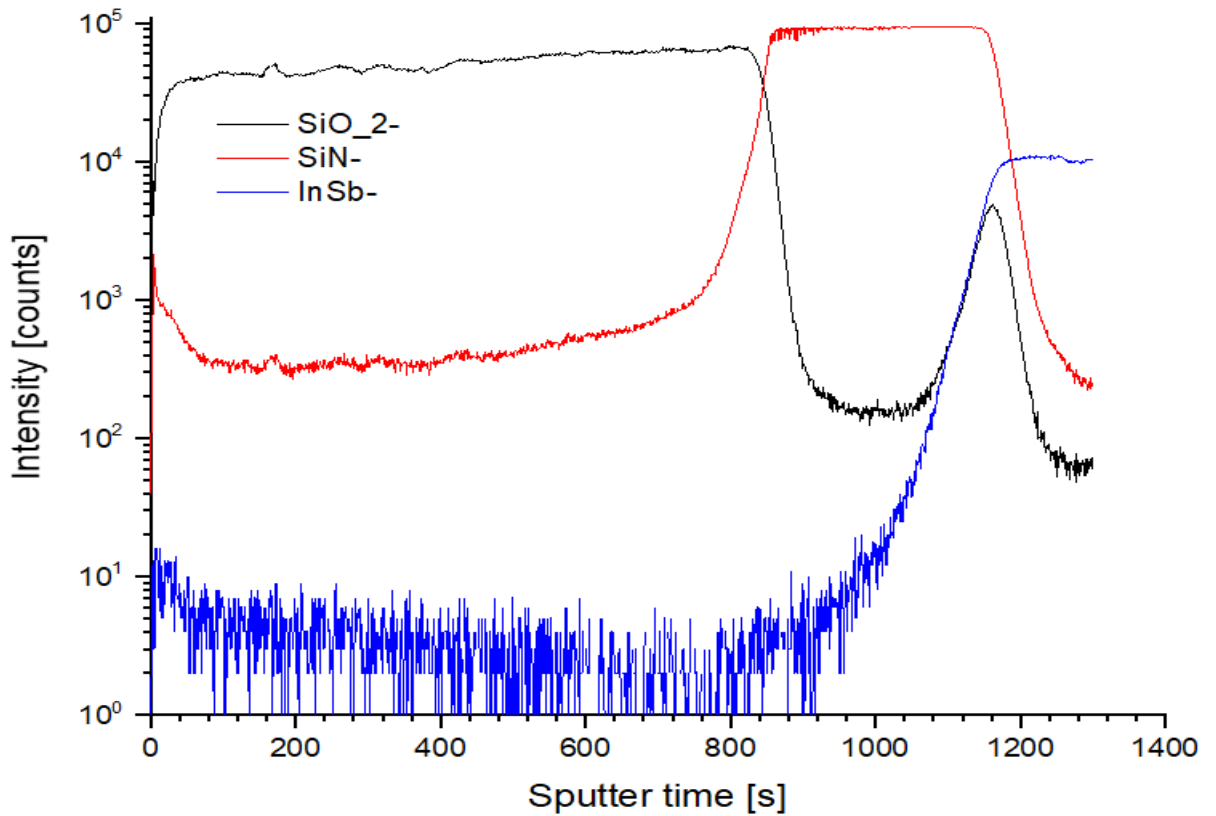
Рисунок 4.3. – Профілі розподілу оксидів InSb отримані методом ВІМС в інтерфейсі InSb-Si₃N₄ з пластини з АО а) та з фотодіюду без АО б)

Дослідження в інтерфейсі InSb-Si₃N₄ показало (рис.4.3.), що утворення АО збільшує кількість оксидів індію на порядок, а антимоніду майже на два порядки. Також збільшується впровадження не тільки оксидів в структуру матеріалу але й силіцій нітриду, що однозначно не приведе до позитивних результатів. Необхідно відзначити, що вирощений АО не перевищує концентрацію InSb, тобто не виконуватиме досконало своєї головної функції пасивуючого шару. Описані вище процеси обмежують час міжопераційного зберігання пластин. Тому запропоновано виконувати обробку поверхні пластин в розчині Na₂S₂, що призводить до пасивації поверхні та усунення шарів оксиду[18]. Обробка дає змогу захистити пластину від впливу повітря і збільшити час міжопераційного зберігання пластин після кожної технологічної операції.

На рис.4.4а. спостерігаємо, що утворення АО спричиняє велике нагромадження силіцій оксиду в інтерфейсі InSb-Si₃N₄. Інтенсивність детектування силіцій оксиду у пластині в порівнянні з фотодіодом (рис.4.4б.) більша на половину порядку, перевищує концентрацію InSb та глибше впроваджується у структуру. Також можемо зазначити, що відсутність АО збільшує утворення силіцій оксиду в шарі силіцій нітриду.



a



б

Рисунок 4.4. – Профілі розподілу силіцій оксиду отримані методом ВІМС в інтерфейсі InSb-Si₃N₄ з пластини з АО а) та з фотодіоду без АО б)

4.3.Опис конструкції фотодіода

Згідно опрацьованих результатів досліджень, аналізу сторонніх фотодіодів та технічної літератури були виготовлені зразки фотодіодів із наступними конструктивно-технологічними параметрами:

Розмір активної області – $\varnothing 1,30\text{мм.}$;

Розмір кристалу – $2,04 \times 2,04\text{мм.}$

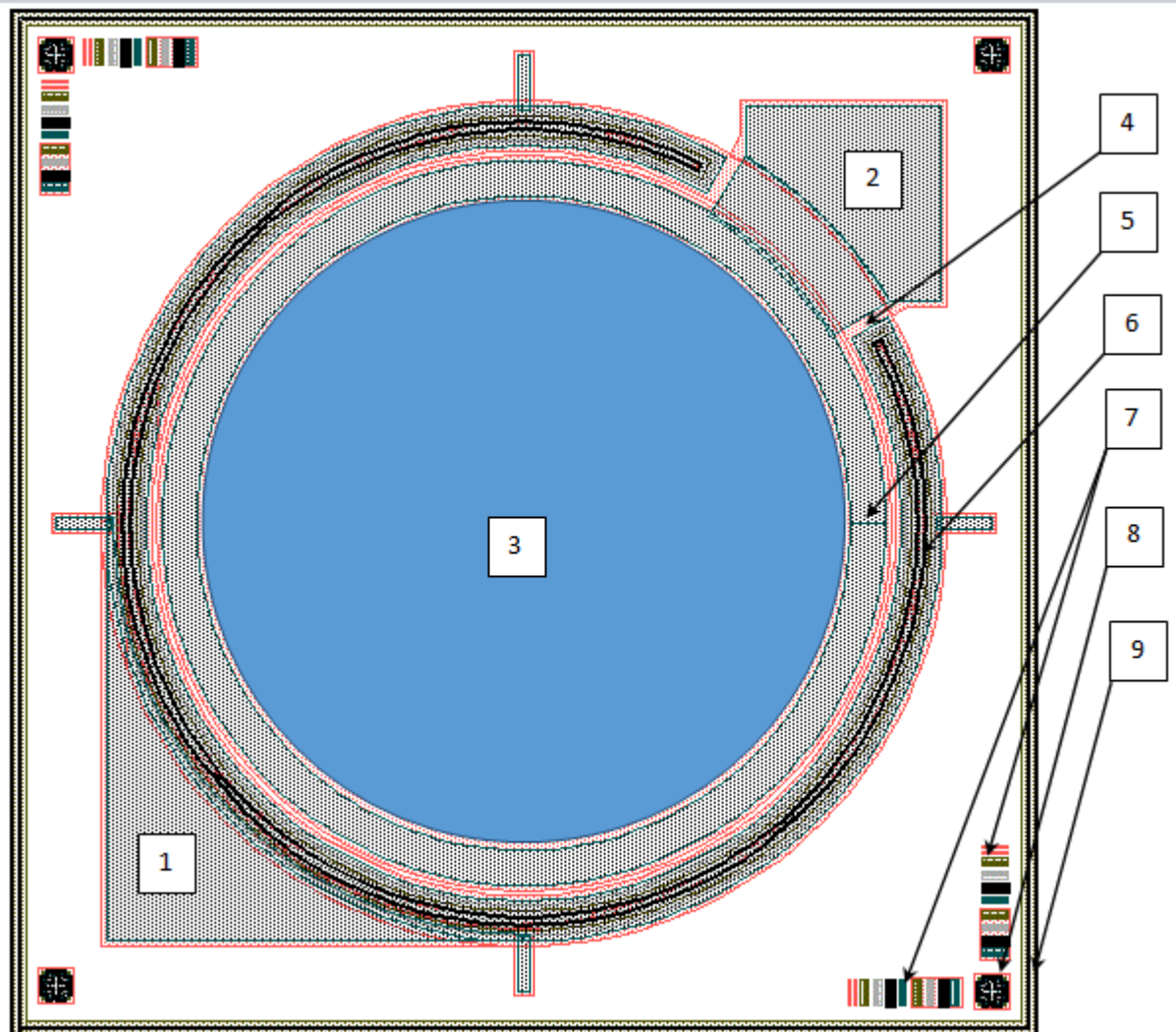


Рисунок 4.5. – Зовнішній вигляд фотодіода:

1. Контактна область катоду;
2. Контактна область аноду;
3. Активна область аноду;
4. Охоронне кільце фотодіода;
5. Омичний контакт до аноду;
6. Омичний контакт до катоду;
7. Позначки для контролю лінійних розмірів в топологічних шарах;
8. Позначки для суміщення фотолітографічних шарів ;
9. Зона розрізання платівки на кристали

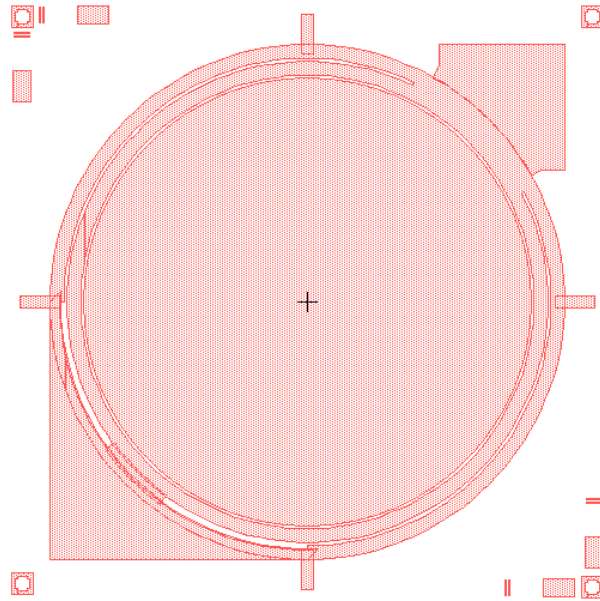


Рисунок 4.6. – Зовнішній вигляд шару «Меца», мінімальні розміри в активній області: елемент - 40 мкм, проміжок між елементами - 10 мкм

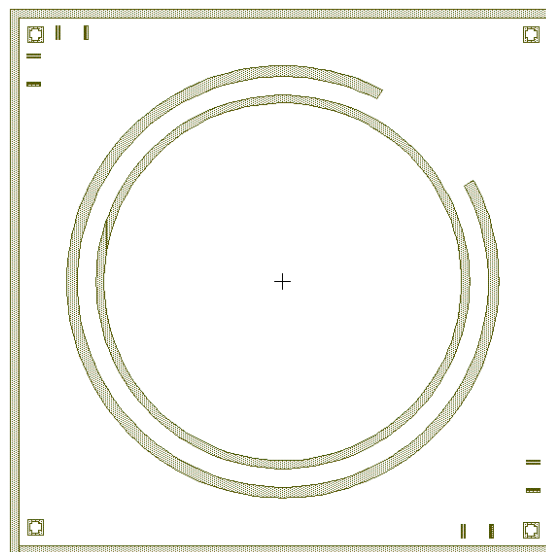


Рисунок 4.7. – Зовнішній вигляд шару «Технологічні контакти», мінімальні розміри в активній області: елемент - 30 мкм, проміжок між елементами - 70 мкм

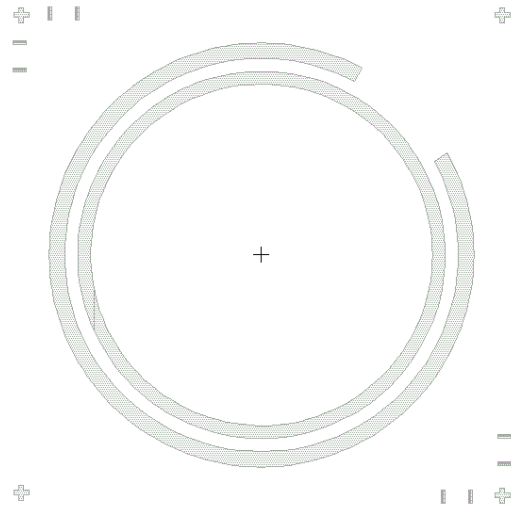


Рисунок 4.8. – Зовнішній вигляд шару «Металл1»(Cr), мінімальні розміри в активній області: елемент - 50 мкм, проміжок між елементами - 50 мкм

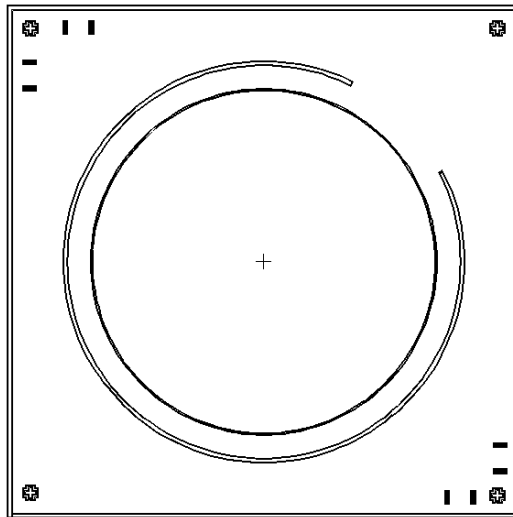


Рисунок 4.9. – Зовнішній вигляд шару «Контакти», мінімальні розміри в активній області: елемент - 10 мкм, проміжок між елементами - 90 мкм

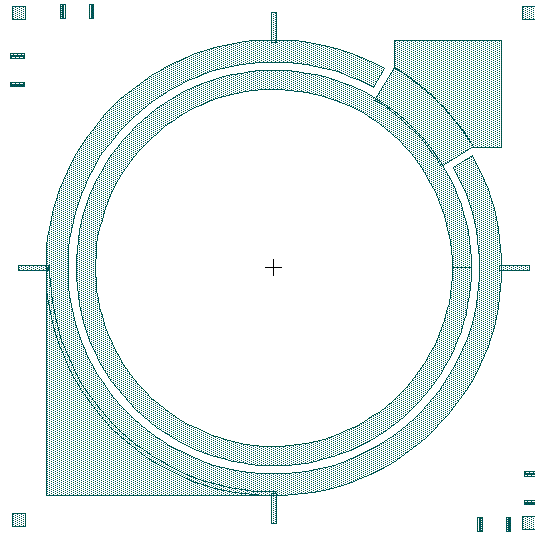


Рисунок 4.10. – Зовнішній вигляд шару «Металл2»(Au), мінімальні розміри в активній області: елемент - 20 мкм, проміжок між елементами - 25 мкм

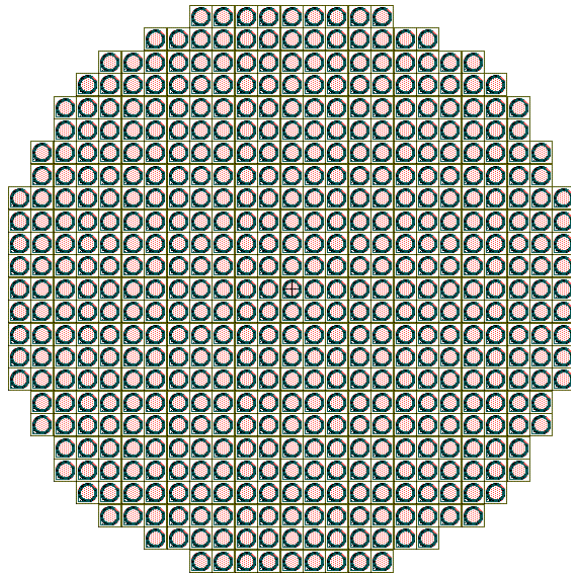


Рисунок 4.11. – Зовнішній вигляд робочого поля фотошаблону на пластині, розмір 51,0·51,0 мм

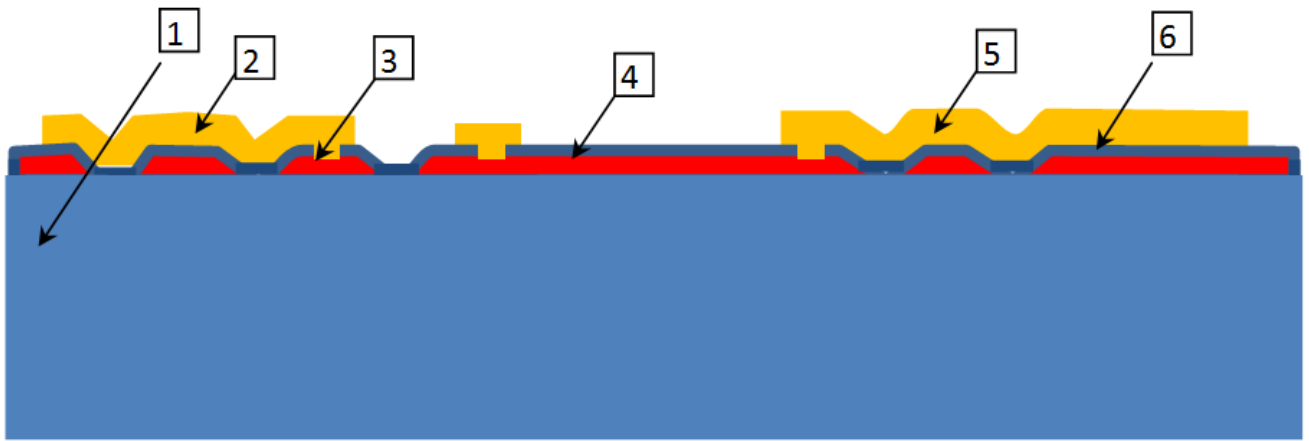


Рисунок 4.12. – Переріз кристалу фотодіода :

1. –пластина InSb n- типу провідності ;
2. – металева розводка катоду та охоронного кільця;
3. – меза-структура охоронного кільця n- типу провідності;
4. – меза-структура аноду р- типу провідності;
5. – металева розводка аноду;
6. – захисне покриття

4.4. Технологічний маршрут виготовлення фотодіода

Вихідна InSb пластина фірми «Galaxy» з діаметром 56mm, n- типу провідності, легована Te, $n_e=(0,8\div 2,0)E14\text{ cm}^{-2}(111)B$.

Етапи виробництва фотодіода ми розглянули в попередньому розділі. Нижче (Таблиця 4) наводиться технологічний маршрут виготовлення досліджуваного фотодіода.

Таблиця 4 – Технологічний маршрут

Назва операції	Технологічний режим	Параметри	Примітки
Розпакування пластин	Розпакування проводити безпосередньо перед процесом		Оригінальна пакувальна тара для пластин фірми «Galaxy»
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)

Продовження таблиці 4

Осадження SiO ₂	SiH ₄ + O ₂	PECVD T<120°C SiO ₂ =175±25nm	
Імплантація Be ⁺	E= 45kV; D=1 · 10 ¹⁴ cm ⁻²		
Імплантація Be ⁺	E= 120kV; D=5 · 10 ¹³ cm ⁻²		
Хіміобробка №1	Ізопропиловий спирт	60±5°C 30min	Видалення фізичних забруднень і знежирюван ня
Сушка	(90±5°C) 20хв. сухим N ₂		
Хіміобробка №2	NH ₄ OH: H ₂ O ₂ :H ₂ O=1:4:20	65±5°C 5min + обмивка в ДІ воді до омності 10 МОm×cm	Кінцеве знежирюван ня
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)
Обробка HMDS			
Нанесення ф/р	dФ/р=1,2÷1,6 мкм.		
Сушка ф/р	(90±5°C) 10хв. сухий N ₂		
Експонуван ня ф/л «Меза»			
Прояв і очищення в ДІ. воді	До омності 10 МОm×cm		
Сушка			
Дублюванн я ф/р			
Травлення InSb	Травник: 48%HF:4%(COOH) ₂ :76%H ₂ SO ₄ :30% H ₂ O ₂ = 20:8:20:1 T=22±1°C,	tтp=45s d=1,55 ÷ 1,85 мкм.	

Продовження таблиці 4

Очищення в ДІ. воді			
Сушка			
Контроль глибини травлення			
Імплантація S ⁺	$E=100 \text{ кэВ}, D=10^{14} \text{ см}^{-2}$		
Видалення ф/р 1ст.	Моноеталамін	$T=65^{\circ}\text{C}$ $t=5 \text{ хв.}$	
Очищення в ДІ. воді			
Видалення ф/р 2ст.	Кип'ятіння в Acetone	$t=3 \text{ хв}$	
Хімообробка 1ст.	Послідовне кип'ятіння в Acetone и Ethanol,	$t=3 \text{ хв}$	
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	$T=90^{\circ}\text{C}, (N_2)$	$t=10 \text{ хв}$	
Хімообробка 2ст.	$NH_4OH:H_2O_2=1:1 T=22\div 23^{\circ}\text{C}.$	$t=5 \text{ хв}$	
Очищення в ДІ. воді			
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	$T=90^{\circ}\text{C}, t=10 \text{ мин } (N_2)$		
Анодне окислення 1 (видалення хім. Забруднень з поверхні InSb)	Електроліт (%): (CH ₃) ₂ NC(O)H – 70 (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ – 0,5 (NH ₄)F – 0,005 C ₃ H ₅ (OH) ₃ – залишок	Щільність струму - 50μA/cm ² до 12V і далі при 13V до щільності струму - 0,5μA/cm ²	
Контроль параметрів АО	Еліпсометрія		
Знімання АО	48%HF : H ₂ O =1:20		
Хімообробка в очищеному ізопропиловому спирті	Кип'ятіння, (видалення абсорбованої вологи з поверхні InSb)	$t=5 \text{ хв}$	

Продовження таблиці 4

Хіміобробка перед відпалом	48%HF : Acetone =1:20		
РТА в дві стадії в H ₂ .	T=280°C 120s -нагрів - 50°C/s + T=380°C 20s нагрів - 50°C/s, охолодження -1,0°C/ s		
Контроль ВАХ			
Анодне окислення 2 (окислення Sb на поверхні InSb)	Електроліт (%): (CH ₃) ₂ NC(O)H – 70 (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ – 0,5 (NH ₄)F – 0,005 C ₃ H ₅ (OH) ₃ – залишок	Щільність струму - 20μA/cm ² до 5V и далі при 7V до Щільність струму - 0,5μA/cm ²	
Контроль параметрів АО		d АО колір -	
Знімання АО 1 стадія	48%HF : H ₂ O =1:20		
Сульфідизація поверхні	1M розчин Na ₂ S в ДІ воді	T=60°C t=3хв	
Очищення в ДІ. воді			
Знімання АО 2 стадія	48%HF : H ₂ O =1:20		
Очищення в ДІ. воді			
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	T=90°C, (N ₂)	t=10 хв	
Контроль ВАХ			
Хіміобробка	NH ₄ OH:H ₂ O ₂ =1:1 T=22÷23°C.	t=5 хв	
Очищення в ДІ. воді			
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	T=90°C (N ₂)	t=10 хв	
Хіміобробка в очищеному ізопропиловому спирті (Isopropanol)	Кип'ятіння, (видалення абсорбованої вологи з поверхні InSb)	t=5хв	

Продовження таблиці 4

Хіміобробка перед відпалом	48%HF : Acetone =1:20		
RTA в H ₂	T=300°C 30хв. Н ⁺ (нагрів - 50°C/s, охолодження -1,0°C/s,)		
Нанесення Si ₃ N ₄	PECVD (SiH ₄ +NH ₃) T=300°C dSi ₃ N ₄ =125±25 нм.		
Контроль параметрів Si ₃ N ₄		dSi ₃ N ₄ колір	
Хіміобробка	Послідовне кип'ятіння в Acetone и Ethanol,	t=3хв	
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	T=90°C, t=10 хв (N ₂)		
Нанесення SOG	3000 об/хв. SiO ₂ =0.4-0.6μ		
Стабілізація SOG	T=130°C. в N ₂	30хв	
Обробка HMDS			
Нанесення ф/р			
Сушка ф/р			
Експонування Ф/л «Контакти»			
Прояв			
Очищення в ДІ. воді			
Сушка			
Дублювання ф/р			
Травлення SiO ₂ /Si ₃ N ₄ до InSb	В буферному травникові [48% HF:40% NH ₄ F: H ₂ O=1:8:2]		
Контроль травлення			
Видалення ф/р	Кип'ятіння в Acetone	t=3 хв	
Хіміобробка	Послідовне кип'ятіння в Acetone и Ethanol,	t=3хв	

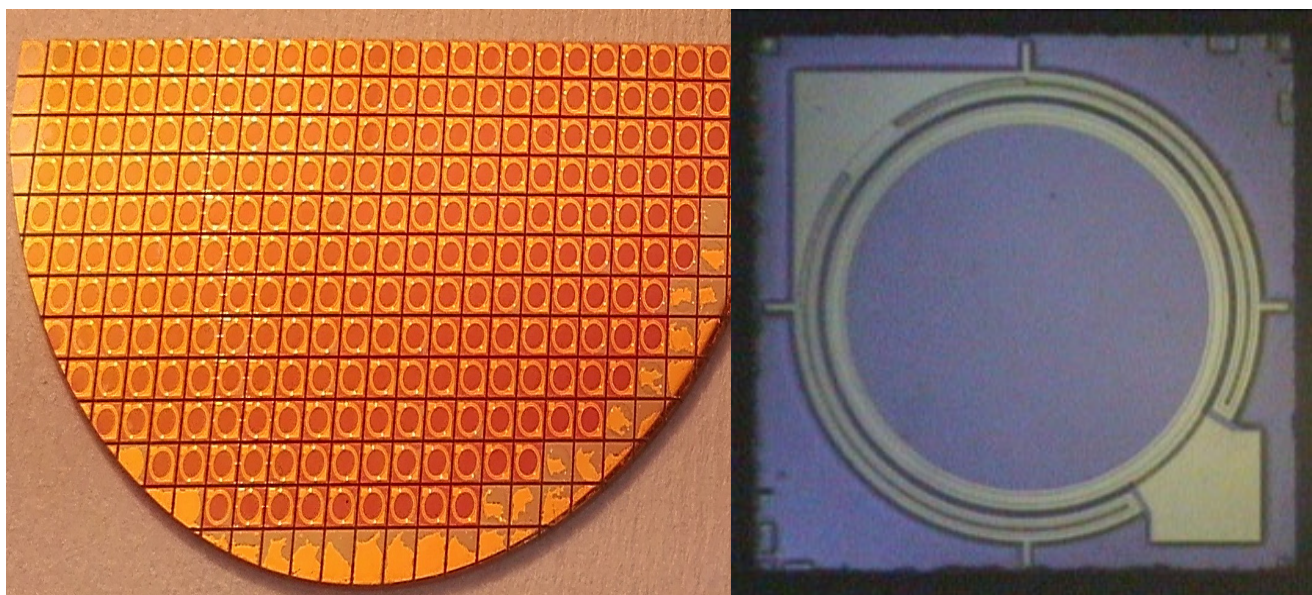
Продовження таблиці 4

Сушка пластин в потоці сухого N ₂	T=90°C, (N ₂)	t=10 хв	
Видалення органічних забруднень	Моноеталамін (МЭА) :H ₂ O ₂ = 1:10.	T=25°C t=5 хв	
Очищення в ДІ. воді			
Хімообробка -1 перед напиленням Me	37%НCl : H ₂ O =1:10		
Очищення в ДІ. воді			
Сушка пластин			
Хімообробка в очищеному ізопропиловому спирті (Isopropanol)	Кип'ятіння, (видалення абсорбованої вологи з поверхні InSb)	t=5хв	
Хімообробка - 2 перед напиленням Me	48%HF : Acetone =1:20		
Напилення Ti 2÷4 nm	PVD	T=150°C, P≤10 ⁻⁶	
Напилення Cr 4÷6 nm			
Напилення Au 150÷250 nm			
Хімообробка перед Ф/л	Послідовне кип'ятіння в Acetone и Ethanol,	t=3хв	
Сушка пластин в потоці сухого N ₂	T=90°C, (N ₂)	t=10 хв	
Обробка HMDS			
Нанесення ф/р			
Сушка ф/р			
Експонування Ф/л «Me»			
Прояв			
Очищення в ДІ воді			

Продовження таблиці 4

Сушка			
Дублювання ф/р			
Травлення Au	10% $K_3[Fe(CN)_6]$: 10% CH_4N_2S : 10% $Na_2S_2O_3 = 1:1:1$ змішувати перед травленням		
Контроль травлення			
Травлення Cr	37% HCl : $H_2O = 2:1$ $T=60^\circ C$, $t=1 \div 3$ сек.		
Контроль травлення			
Травлення Ti	48% HF : $H_2O = 1:20$ $T=22 \div 23^\circ C$, $t \sim 3 \div 5$ сек.		
Контроль травлення			
Видалення ф/р - 1	Кип'ятіння в Acetone $t=3$ хв		
Видалення ф/р - 2	Моноетаноламін (МЭА) $T=65^\circ C$ $t=5$ хв.		
Очищення в ДІ воді			
Сушка	$T=90^\circ C$, $t=10$ хв (N_2)		
Термообробка	$T=100^\circ C$, $t=30$ хв (H_2)		
Контроль ВАХ			
Контроль зовнішнього вигляду	Не допускається відшаровування плівки Au		

Згідно описаного технологічного маршруту отримано лінійку фотодіодів зображених на рис.4.13.



а

б

Рисунок 4.13. – Фото виготовленої лінійки фотодіодів а) та фото одного фотодіода зблизька б)

4.5. Дослідження ВАХ отриманих фотодіодів

Після виготовлення фотодіодів на вимірювальному пристрої Л2-56 досліджувалась їх ВАХ і якісні характеристики їх чутливості до впливу ІЧ випромінювання, утвореного макетним джерелом:

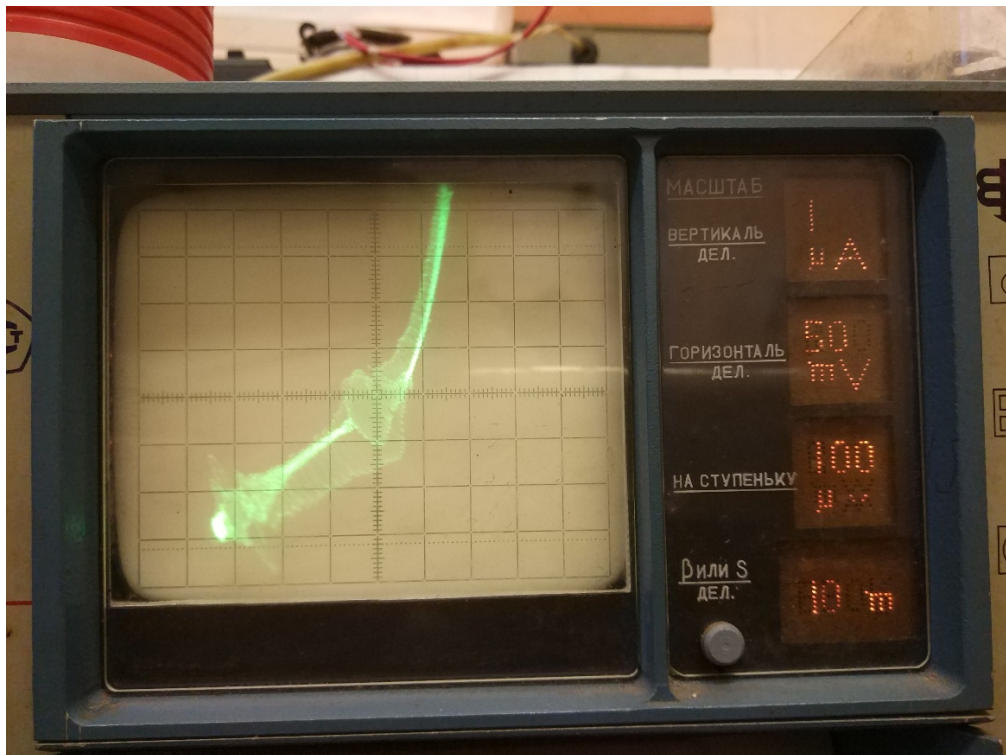


Рисунок 4.13. – ВАХ фотодіода з великим вмістом оксидів в інтерфейсі InSb-Si₃N₄



а

б

Рисунок 4.13. – ВАХ кінцевого фотодіода з фотовідкликом на макетне джерело з температурою 530 С а) та при природньому освітленні б)
З рис. 4.13 отримуємо інтегральній фототовідклик 750μА для фотодіодів.

Золоті контакти зварювались методом розщепленого електрода, який передбачає відсутність механічного тиску на підкладку. Таким чином можемо заявити, що отримані фотодіоди хорошої якості.

Висновок до розділу:

Провівши дослідження підкладки методом РФЕС отримали підтвердження припущень перебігу взаємодії InSb з киснем. Утворюються оксиди антимоніду та індію, що призводять до утворення провідних областей, скраплення індію, утворення кристалічного антимоніду на поверхні та відшарування поверхневих шарів. Було вирішено провести додаткові дослідження методом ВІМС, які дали інформацію про те, як утворення АО впливає на концентрацію оксидів в інтерфейсах InSb-Si₃N₄. Накопичення АО не є рівномірним і власні оксиди впроваджуються в підкладку. Також при утворенні АО виникає накопичення силіцій оксиду в вище згаданому інтерфейс, якого не повинно там бути. Дослідження структури без АО виявило, що оксиди все таки утворюються однак на порядок меншій кількості. ВАХ поверхні з великим вмістом оксидом незадовільні, тому в кінцевому приладі АО не використовується, хоча в технологічному маршруті використовується для видалення хімічних забруднень з поверхні та окислення антимоніду з подальшим усуненням. Методі ВІМС також дав інформацію про профілі розподілу імплантованої домішки берилію. Моделювання у програмі SRIM із попереднього розділу підтвердились, тому в кінцевому технологічному маршруті використовується двохстадійний режим імплантації. ВАХ доводять правильну роботу кінцевого пристрою.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї проекту

Розробимо стартап-проект для подальшої реалізації виробництва фотодіодів для застосування у різних сферах.

Таблиця 5 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування ІЧ-фотодіодів на основі монокристалу антимоніду індію	1. Військова галузь	Підвищення чутливості та надійності приладів виявлення та наведення, спрощене користування
	2. Медицина	Підвищення чутливості, та зменшення розмірів приладів для обстеження пацієнтів
	3. Енергетика	Підвищення якості приладів для виявлення втрат тепла
	4. Служби порятунку	Ефективніший пошук постраждалих при надзвичайних ситуаціях, орієнтація в умовах зменшеної видимості

Продовження таблиці 5

	5. Транспорт	Орієнтація за умов поганої видимості, виявлення поломок
--	--------------	---

Фотодіоди, профіль та технологічний шлях яких ми змоделювали відрізняються від існуючих аналогів більшою чутливістю у дальньому ІЧ діапазоні та надійністю. Маючи декілька конкурентів, ми доведемо свою вигідність та успішність приладобудування.

Конкурент №1: виробник ІЧ-систем наведення «Guidance Marine»

Конкурент №2: компанія-виробник військового ІЧ-обладнання «Reynard Corporation»

Конкурент №3: компанія-виробник ІЧ-детекторів «VISHAY»

Таблиця 6 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Економічні	1000 у.о.	500 у.о.	100 у.о.	2000 у.о.		+	
2	Призначення	Детектор дальнього ІЧ діапазону	Детектор дальнього ІЧ діапазону	Детектор дальнього ІЧ діапазону	Детектор дальнього ІЧ діапазону			+

Продовження таблиці 6

3	Надійності	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років		+	
4	Технологічність	Необхідне охолодження, більша чутливість в дальньому ІЧ діапазоні	Необхідне охолодження	Необхідне охолодження	Працює без охолодження		+	
5	Ергономічні	-	-	-	-		+	
6	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7	Естетичні	-	-	-	-		+	
8	Транспортальності	-	-	-	-		+	
9	Екологічності	-	-	-	-		+	
10	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 7 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій

Продовження таблиці 7

1.	Виготовлення ІЧ датчика	Іонна імплантація	Наявна	Доступно
		Рідиннофазна епітаксія	Наявна, але не налаштована під масове виробництво	Доступно

Обрана технологія для реалізації стартап-проекту: Іонна імплантація.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 8 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	190%

Ринок потенційно привабливий для входження, за умов наявності фінансування для налагодження великого виробництва.

Таблиця 9 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/ п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Підвищенна чутливість датчиків	Компанії-виробники ІЧ-обладнання (здебільшого для військових та медичних цілей)	-	Товар має успішно працювати в дальньому ІЧ-діапазоні

Таблиця 10 – Фактори загроз

№ п/ п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним, саме тому необхідна наявність персоналу зі спеціалізованими навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях

Продовження таблиці 10

2	Потреба в наявності ресурсів	Для налагодження виробництва необхідна наявність приміщень для безпосередньо виробництва та тестування працездатності продукту	Укладання договорів з науково-дослідними інститутами та поставниками ресурсів, оренда приміщень виготовлення та тестування продукту
---	------------------------------	--	---

Таблиця 11 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Сприяє підвищенню якості розробки та виготовленню нових продуктів	Покращення параметрів та характеристик товару, виготовлення нових продуктів
2.	Попит	Існування стійкого попиту говорить про зацікавленість споживача у покращенні якості продукту	Покращення параметрів та характеристик товару, збільшення його вартості

Таблиця 12 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - чиста	Існування великої кількості компаній на ринку	Підвищення якості товару за рахунок використання новітніх технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби: - міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується країнами чи територіально	Створювання сайту компанії, відкриття підприємств за кордоном
3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують аналогічні товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у технологічних маршрутах, якості, ціні, тощо	Аналіз та пошук інформації новітніх розробок, новинок, виробництва продукції конкурентів

Продовження таблиці 12

4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якості та зменшення вартості товару
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	Передбачає продаж продукції за нижчими цінами, ніж у конкурентів	Розробка стратегії здешевлення технології виробництва для зменшення вартості продукту
6. За інтенсивністю: - немарочна	Роль торгової марки не є вирішальною	Рекламна компанія продуктів

Таблиця 13 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Guidance Marine», «Reynard Corporation», «VISHAY»	Збільшення виробництва	Продаж та збут я товару компанією-Розробником та реалізаторами	Вимоги до якості, надійності і вартості	Товари-замінники відсутні

Продовження таблиці 13

Висновки:	Висока інтенсивність через давню присутність конкурентів на ринку	Потенційні конкуренти можливі, але не передбачаються	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Висока якість продукту, його надійність та доступність	Обмежень немає
-----------	---	--	---	--	----------------

Для отримання більшої конкурентоспроможності на ринку, при розробці та виробництві пристрою необхідно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі детектування та інженерів для вдосконалення технології виробництва, характеристик та якості товару.

Таблиця 14 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Більша чутливість	Переважає більшість продуктів конкурентів не може зрівнятися за параметрами чутливості
2.	Якість розробки та високі характеристики товару	Продукт має однаково добре виявляти ІЧ-випромінювання за різних погодних умов, кутах нахилу, температури тощо
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та технології виробництва потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна продукції не має бути надто висока, щоб знайти потенційних покупців

Таблиця 15 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п / п	Фактор конкурентоспроможності	Бал и 120	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “ЗМ”							
			- 3	- 2	- 1	0	+1	+ 2	+3	
1 .	Більша чутливість	20		+						
2 .	Якість розробки та високі характеристики товару	16			+					
3 .	Наявність наукових ресурсів	13					+			
4 .	Економічний (ціна товару)	16				+				

Таблиця 16 – SWOT- аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: Висока чутливість, якість розробки та високі характеристики товару	Слабкі сторони: Наявність наукових ресурсів
Можливості: Зменшення ціни товару приведе до більшого попиту, а відтак і до збільшення інтересу у подальших наукових дослідженнях	Загрози: Відсутність досліджень для покращення технології приведе до її застою і зрештою, до зменшення попиту на товар

Таблиця 17 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Пошук інвесторів, пошук компаній збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	80%	3 роки
2.	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок	50%	5 роки

Обрано альтернативу №1.

5.4. Розробка ринкової стратегії проекту

Таблиця 18 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/ п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні установи	Висока	Високий	Висока	Середня
2	Приватні підприємства	Середня	Середня	Низька	Висока

Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.

Таблиця 19 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку

Продовження таблиці 19

1.	Військові контракти	За рахунок великої зацікавленості військової сфери у якісних та менш громіздких засобів ПЧ-детектування можна добитися лідерства на ринку військового обладнання	Кращі характеристики товару за меншою ціною	Стратегія спеціалізації
----	---------------------	--	---	-------------------------

Обрано стратегію спеціалізації.

Таблиця 20 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Так	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 21 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока чутливість, менші розміри	Стратегія спеціалізації	Чутливість, зменшення кількості браку	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 22 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Зменшення розмірів обладнання та залежності від охолодження	Більша чутливість	Конкуренти пропонують менш чутливі системи, за більший кошт

Таблиця 23 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Слугування інкапсулянтном для з'єднання захисного скла із сонячним елементом з підвищенням його ККД		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Підвищення ККД ФЕП 2. Ціна 25 у.о./мм ² 3. Висока чутливість. 4. Охолоджена система.	М М М М	
	Якість: висока,		
	Пакування: пластини		
	Марка: "ERVC"		
	III. Товар із підкріплення м	До продажу: гарантія	
Після продажу: доставка, обслуговування			
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Таблиця 24 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	20–50 у.о./мм ²	7000 у.о. і вище	20 – 40 у.о./мм ²

Таблиця 25 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, розподіл, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Безпосередній збут продукції покупцям від виробника

Таблиця 26 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Застосування товару у військовій сфері (системи переносних зенітноракетних комплексів, голівки самонаведення)	Прямі – інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Неохолоджувані системи, висока чутливість в ближньому ІЧ діапазоні випромінювання	Поширення знань про підприємство і характеристики товару серед можливих клієнтів	Звернення ґрунтується на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти.

Висновки до розділу:

Можливість ринкової комерціалізації та впровадження проекту є вагомою через наявність якісних характеристик пристрою та відсутність високої конкуренції на ринку. Першими кроками можуть бути отримання державних тендерів на замовлення виробництва таких пристроїв, для подальшого розвитку виробництва продукції.

ВИСНОВКИ

В ході проведеної роботи проведено огляд та узагальнено літературні дані з технології виготовлення InSb фотодіодів методом іонної імплантації берилію в підкладку n-InSb. На основі аналізу наукової та технічної літератури, патентів та зарубіжних зразків фотодіодів розроблено конструкцію пристрою і запропоновано оптимальний технологічний маршрут виготовлення.

Проведений аналіз впливу технологічних операцій на утворення радіаційних точкових та структурних дефектів. Виявлено, що при імплантації домішкових атомів однією енергією при низьких дозах легування у поверхневій області виникає низька концентрація домішок, що не дозволяє сформувати якісний контакт, а висока доза призводить до виникнення глибоких дефектів, які не можна усунути післяімплантаційним відпалом. Запропоновано проводити двохстадійний процес імплантації з використанням захисного шару. Показано, що даний підхід дозволяє покращити електричні параметри створених структур.

Проведено дослідження, методами РФЕС та ВІМС, впливу анодного окислу на накопичення власних оксидів та силіцій оксиду в інтерфейсі InSb-Si₃N₄. Встановлено, що він спричиняє негативні ефекти. Прийнято рішення вилучити утворення АО із технологічного маршруту. Показано причини відшарування поверхневих шарів, виникнення провідних оксидів, скраплень індію та процесів, що призводять до їх появи.

Проведено моделювання впливу типу пасивуючого покриття на оптичні характеристики пристрою. Зміна пасивуючого шару із силіцій оксиду на силіцій нітрид суттєво не впливає рівень генерації електрон-діркових пар .

Проведено моделювання профілів розподілу домішок в матеріалі, підтверджено їх правильність. Визначили, що оптимальним значенням енергії імплантації берилію в підкладку InSb є 45 і 120 кеВ ; ОПЗ залягає на глибині до 1.4мкм; основна кількість дефектів розміщується в нанесеному захисному шарі; для усунення дефектів оптимально використовувати низькотемпературний швидкий

термічний відпал (RTA). Виготовлено лінійку фотодіодів з низьким відсотком браку, інтегральній фототовідклик становить $750\mu\text{A}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рогальский А.В. Инфракрасные детекторы. /А.В. Рогальский – Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. Vallone, Marco (2016). Physics-based simulation of narrow and wide band gap photonic devices. Aprile 2016 / Marco Vallone – Politecnico di Torino P.189
3. 박세훈. Investigation on InSb Epitaxial Growth and Surface Passivation to Improve Device Performances 2016-02 / 박세훈 Publisher 서울대학교 대학원. 2016.P.139
4. Ф. Ф. Комаров Ионная и фотонная обработка материалов : электронный учебно-методический комплекс / Ф. Ф. Комаров; БГУ, Факультет радиофизики и компьютерных технологий. 2006. – С. 296
5. Ali Asadollahi. Comparison of Diffused and Implanted InSb pn-photodiodes Performance / Ali Asadollahi KTH, Examiner: Prof. Mattias Hammar School of Information and Communication Technology (ICT)., 2011. – P.69
6. A. Declémy, T. Sauvage, E. Kotai, P. Lévêque, and M. I. Abd El-Ati. Be- and Mg-ion implantation-induced damage in InSb. 2001./ A. Declémy, T. Sauvage, E. Kotai, P. Lévêque, and M. I. Abd El-Ati.// Mater. Sci. Semicond. Process. Volume 4, Issues 1–3, 6 February 2001., – Pages 277-279
7. Hurwitz C.E. and Donnelly J.P. Planar InSb photodiodes fabricated by Be and Mg ion implantation./ Hurwitz C.E. and Donnelly J.P.// Solid-Slate Electronics. 1975. 18. – P. 753–756.
8. J. Liu and T. Zhang. Rapid thermal annealing characteristics of Be implanted into InSb./ J. Liu and T. Zhang. // Appl. Surf. Sci. –1998. – 126 (3–4). – P. 231–234
9. Епифанов Г.И. Физика твердого тела./Г.И. Епифанов, – М.: Высшая школа, 1977. – 288с
- 10.S. J. Pearton, S. Nakahara Implantation characteristics of InSb /S. J. Pearton, S. Nakahara, A. R. Von Neida, K. T. Short, and L. J.// Journal of Applied Physics 66, 1989 – P.39-45

11. Білінський Й.Й., Аналіз сучасних багатоеlementних фотоприймальних пристроїв та оптикоелектронних методів і засобів на їх основі. /Білінський Й.Й // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5 – с. 30-39
12. InSb фотодіоди (Огляд. Частина II) / А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.М. Матіюк, А.І. Ткачук // Оптоелектроника и полупроводниковая техника: Сб. научн. тр. — 2016. — Вип. 51. — С. 69-90
13. InSb фотодіоди (Огляд. Частина I) / А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.М. Матіюк, А.І. Ткачук // Оптоелектроника и полупроводниковая техника: Сб. научн. тр. — 2016. — Вип. 50. — С. 53-67
14. Луфт Б.Д., Перевошиков В.А., Возмилова Л.Н. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников./ Луфт Б.Д., Перевошиков В.А., Возмилова Л.Н. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
15. C. Wilmsen, Physics and chemistry of III-V compound semiconductor interfaces /C. Wilmsen, Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 1985 edition (March 22, 2012). — 478 p. — ISBN 978-1468448375
16. Романюк Б.М. Дослідження механізмів дефектоутворення та сегрегації антимонію у поверхневих шарах InSb, імплантованих іонами берилію та магнію / Б.М. Романюк, В.П. Мельник, В.Г. Попов, В.П. Кладько, О.Й. Гудименко, О.І. Любченко, В.В. Стрельчук, Ю.М. Насека // VII українська наукова конференція з фізики напівпровідників "УНКФН-7", Збірник тез. — Дніпро, Україна. — 26-30 вересня 2016. — с.362.
17. Сабов Т.М. Іонно-стимульована трансформація структури та оптоелектричних параметрів кристалів хромогенних і фоточутливих шарів., дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.07 / Сабов Томаш Мар'янович ; НАН України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова. - Київ, 2019. - 165с.
18. F.Olcaytug K.Riedling W.Fallmann A low temperature process for the reactive formation of Si₃N₄ layers on InSb/ F.Olcaytug K.Riedling W.Fallmann // Thin Solid Films, 67 — (1980) — 321-324P.

19. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. / Kane Yee. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation — 1966. — Vol. 14, no. 3. — P. 302—307.
20. S.S. Zivanovic, K.S. Yee, and K.K. Mei. A subgridding method for the Time Domain Finite-Difference Method to solve Maxwell's equations. / S.S. Zivanovic, K.S. Yee, and K.K. Mei. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech.: journal. — 1991. — Vol. 38. — P. 471.
21. L. Santinacci Growth and characterization of thin anodic oxide films on n-InSb (100) formed in aqueous solutions/ L. Santinacci, G.I. Sproule, S. Moisa, D. Landheer, X. Wu, A. Banu, T. Djenizian, P. Schmuki, M.J. Graham// Corrosion Science 46 (2004) — p. 2067–2079
22. Jolm F. Moulder Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy /Jolm F. Moulder William F. Stickle Peter E. Sobol Kenneth D. Bomben Eden Prairie, Minn.: Published by Perkin-Elmer Corporation Physical Electronics Division – 1997 – p.260
23. V.V. Korotyeyev, V.O. Kochelap, S.V. Sapon, B.M. Romaniuk, V.P. Melnik, O.V. Dubikovskiy, T.M. Sabov. Explosive Be-ion implanted p-n InSb diode for infrared applications. Modeling, fabrication and characterization. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2018. 21 (3). – P. 294-306.
24. Мирофьянченко А.Е., Исследование морфологии поверхности полупроводниковых подложек InSb, предназначенных для ИК-фотоэлектроники./ Мирофьянченко А.Е., Коротяев Е.Д., Яковлева Н.И.// Прикладная физика. – 2014. №3. – С. 55–60.
25. Перевошиков В.А. Процессы химико-динамического полирования поверхности полупроводников. / Перевошиков В.А. // Высокочистые вещества. – 1995. №2. – С.5-29.