

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

---

(назва факультету, інституту)

Кафедра мікроелектроніки

---

(назва кафедри)

До захисту допущено

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О. В. Борисов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

з напрямку підготовки \_\_\_\_\_ 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»  
(код і назва)

**на тему: Дифузійно-рекомбінаційні параметри монокристалічного кремнію**

Виконав: студент 6 курсу, групи ДП-81мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Демидов Володимир Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник академік, д.т.н., професор Якименко Ю.І.

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з нормоконтролю \_\_\_\_\_

(назва розділу)

доц., к.т.н., Орлов А.Т.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. Шмирьова Л.М.

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

Кафедра електронних приладів та пристроїв

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень  
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 152 «Мікро- та наносистемна техніка»  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.В.Борисов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

*групи ДП-81 Демидову Володимиру Володимировичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дифузійно-рекомбінаційні параметри монокристалічного кремнію,

науковий керівник дисертації академік, д.т.н., проф. Якименко Ю.І.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження є пластини монокристалічного кремнію, призначені для виготовлення фотоперетворювачів

4. Предмет дослідження час життя і дифузійна довжина

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Відповідно до поставленої мети в роботі були заплановані такі завдання:

- на основі огляду та аналізу існуючих методик, які використовують фото інжекцію для визначення дифузійної довжини і часу життя, вибрати відповідні методики вимірювання;

- обрати технологію створення алюмінієвих «активних» (інжектуючих) та пасивних контактів на поверхні пластин;

- провести вимірювання дифузійної довжини та часу життя щонайменше у двох точках на поверхні монокристалу кремнію за допомогою експериментального стенду;

- оцінити придатність світлової смужки для вимірювання дифузійної довжини, так і визначення релаксаційного часу життя, складеної із 6 лінійно розташованих світлодіодів червоного діапазону;

- для визначення розподілу дифузійної довжини та часу життя використати різні комбінації контактних пар алюміній – кремній, які термічно напилені через маску;

- перевірити методику суміщеного одночасного вимірювання дифузійної довжини і часу життя в одному циклі;

- по результатах вимірювань, проведених на експериментальному стенді, зробити висновок про придатність суміщеної методики, виявити її недоліки та запропонувати шляхи їх подолання.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

1. Конструкція та будова промислового вимірювального стенду.

2. Схема практичної реалізації фото інжекційного методу вимірювання дифузійної довжини.

3. Модельне зображення досліджуваних зразків пластин кремнію.

4. Результати вимірювань та розрахунків.

5. Висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доцент, к.т.н. Ільченко В.І.		
Розділ 2	доцент, к.т.н. Ільченко В.І.		
Розділ 3	доцент, к.т.н. Ільченко В.І.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд літератури, ознайомлення з вимірювальними стендами		
2.	Практична робота на вимірювальних стендах		
3.	Проведення вимірів ,визначення похибок (систематичних,		

	випадкових )		
4.	Збір і обробка інформації та даних		
5.	Систематизація даних		
6.	Узагальнення матеріалу та оформлення пояснювальної записки		
7.	Попередній захист магістерської дисертації		
8.	Захист магістерської дисертації		

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Демидов В.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

академік, д.т.н., проф. Якименко Ю.І.

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Дифузійно-рекомбінаційні параметри монокристалів кремнію» містить основну частину на 106 сторінках, 4 розділи, 26 ілюстрацій, 77 формули, 29 таблиця, 1 додаток і 31 джерело в переліку посилань.

**Об'єкт та предмет дослідження.** Пластини монокристалічного кремнію, призначені для виготовлення фотоперетворювачів.

**Мета роботи:** визначення дифузійної довжини та часу життя носіїв заряду та її розподілу по площині пластин кремнію .

**Актуальність** обов'язковою процедурою виготовлення перетворювачів сонячної енергії в електричну є визначення найважливіших електрофізичних параметрів, таких як дифузійна довжина, час життя та коефіцієнт дифузії для високоефективних фотоперетворювачів.

**Методики дослідження** вищевказані електрофізичні параметри зазвичай визначаються кожен окремо, недоліком є те, що умови за яких визначаються вищевказані параметри різні, такі параметри, як дифузійна довжина і час життя дають можливість розрахувати коефіцієнт дифузії нерівноважних носіїв заряду.

**Наукова новизна одержаних результатів** в магістерській дисертації розглядається суміщений метод визначення дифузійної довжини і часу життя з використання фото інжекції нерівноважних носіїв заряду, як для визначення дифузійної довжини так і для визначення часу життя. Відомі з літератури методи визначення часу життя і дифузійної довжини не залежні по умовам вимірювання фото інжекційним методом, оскільки ці фізичні параметри залежать від рівня інжекції та спектральних характеристик світлового потоку.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результатом роботи є сконструйований стенд для вимірювання дифузійної довжини та релаксаційної характеристики часу життя фотоінжекційним методом. Сфера застосування даного стенду - використовується для одночасного стаціонарного вимірювання важливих досліджуваних показників, які використовуються при виготовленні

фотоперетворювачів, такі як час життя та дифузійна довжина в лабораторних умовах.

Ключові слова: кремній, пластини, фотоперетворювач, фото-Е.Р.С., світлова смужка, дифузійна довжина, фото інжекція, сонячні елементи, домішки, рекомбінація, час життя, коефіцієнт дифузії, установка для вимірювання дифузійної довжини, рекомбінаційні процеси, метод Вальдеса.

## ABSTRACT

Master's thesis on "Diffusion-recombination parameters of silicon single crystals" includes 106 pages, 4 sections, 26 illustrations, 77 formulas, 29 table, 1 appendices and 31 sources in the reference list.

Object and subject of study. Monocrystalline silicon wafers for photoconverters.

Purpose: to determine the diffusion length and lifetime of charge carriers and its distribution over the plane of silicon wafers.

The urgent procedure for making solar-to-electrical converters is to determine the most important electrophysical parameters, such as diffusion length, lifetime, and diffusion coefficient for high-performance photoconverters.

Methods of study the above electrophysical parameters are usually determined individually, the disadvantage is that the conditions under which the above parameters are different, such as diffusion length and lifetime allow to calculate the diffusion coefficient of non-equilibrium charge carriers.

The scientific novelty of the obtained results in the master's thesis deals with the combined method of determining the diffusion length and lifetime using photo injection of non-equilibrium charge carriers, both to determine the diffusion length and to determine the life time. Known methods from the literature for determining the time of life and diffusion length are not dependent on the conditions of photo measurement by injection method, since these physical parameters depend on the level of injection and the spectral characteristics of the light flux.

The practical significance of the results obtained. The result of the work is a designed stand for measuring the diffusion length and relaxation characteristic of the life time by photoinjection method. The scope of this stand is used for the simultaneous steady-state measurement of important test parameters used in the manufacture of photoconverters, such as lifetime and diffusion length under laboratory conditions.

Keywords: silicon, plates, photoconverter, photo-ERS, light bar, diffusion length, photo injection, solar cells, impurities, recombination, lifetime, diffusion coefficient, installation for measuring diffusion length, recombination processes, method Valdes.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ДИФУЗІЙНА ДОВЖИНА, ЧАС ЖИТТЯ ТА ЇХ ЗНАЧЕННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ.....	15
1.1. Релаксаційна характеристика часу життя та визначення дифузійної довжини, як параметру дифузійного процесу.....	15
1.2. Методи прямого незалежного визначення дифузійної довжини та часу життя в пластинах кремнію.....	28
1.3. Рухома світлова смужка (метод Вальдеса).....	36
Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З РОБОТОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО СТЕНДУ ТА ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ПЛАСТИН КРЕМНІЮ.....	41
2.1. Будова та принцип дії вимірювальних стендів .....	41
2.2. Формування та вибір джерела світла для формування світлової смужки... ..	50
2.3. Очистка поверхні пластин кремнію для кращої адгезії алюмінієвої контактної плівки та зменшення швидкості поверхневої рекомбінації.....	57
2.4. Виготовлення бар'єрного контакту кремній - алюміній (Бар'єр Шотки).....	64
Висновки до розділу 2.....	68
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИФУЗІЙНОЇ ДОВЖИНИ ТА ЧАСУ ЖИТТЯ .....	69
3.1. Опис вимірювального стенду .....	69
3.2. Вимірювання дифузійної довжини та релаксаційної характеристики часу життя.....	73
3.3. Обробка результатів вимірювань.....	81
Висновки до розділу 3.....	84

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	85
4.1. Опис ідеї проекту.....	85
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	86
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	86
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	91
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	93
Висновки до розділу 4 .....	94
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97
ДОДАТКИ.....	100

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ**

CE - сонячні елементи

Si - кремній

ФЕМ - фото електромагнітний ефект

ЕРС - електрорушійна сила

$\rho$  - об'ємний заряд

$\varepsilon$  - діелектрична провідність

$\xi$  - товщина шару об'ємного заряду

$j$  - густина струму

$r$  - швидкість рекомбінації

$\tau$  - час життя

$D$  - коефіцієнт дифузії носіїв заряду

$L$  - дифузійна довжина

$\phi$  - електростатичний потенціал

$n$  - концентрація електронів

$p$  - концентрація дірок

$\Phi$  - робота виходу

$\mu$  – дрейфовий рух носіїв заряду

$N$  - концентрація

$v_D$  - дифузійна швидкість

$x$  - відстань від краю світлової смужки до точкового контакту

$\lambda$  – довжина хвилі

$e$  - заряд електрона

$c$  - швидкість світла

$E$  - енергія носіїв заряду

$\alpha$  - коефіцієнт поглинання

## ВСТУП

Використання сонячної енергії є тенденцією, яка швидко набирає популярність та перспективність і, що найбільш важливо, це поновлюване джерело енергії, яке ніколи не зникне. Хоча сонячна енергія загальнодоступна, використання цієї енергії в корисних цілях являється складним завданням. У даний час поточні дослідження спрямовані на перетворення всієї отриманої сонячної енергії в корисну електричну енергію.

Не зважаючи на велику кількість матеріалів для виготовлення сонячних елементів (СЕ), найбільшого розповсюдження набули фотоелектричні перетворювачі на основі кремнію (Si). Основна частина світового ринку фотоелектричних джерел енергії приходить на кремнієві сонячні батареї. Їх масове впровадження поки неможливе через, відносно високий ціновий параметр, значний відсоток - це ціна кремнієвого матеріалу. Тому виробництво ефективних недорогих сонячних фотовольтаїчних перетворювачів кремнію вимагає отримання дешевих вихідних матеріалів з відповідними фотоелектричними параметрами, які повинні бути збалансовані у процесі виготовлення сонячних батарей, та у процесі експлуатації [1].

Дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду  $L_D$  в Si є одним з важливих параметрів, які характеризують відповідність матеріалу для виготовлення ефективних СЕ. При збільшенні швидкості рекомбінації неосновних носіїв заряду, підвищується вміст шкідливих (рекомбінаційно-активних) домішок та дефектів та знижується  $L_D$ . Отже, кремнієві пластини, використовувані для виготовлення сонячних фотоелектричних перетворювачів, потребують відносно високих стандартів щодо дефектів та вмісту рекомбінаційно-активних домішок, адже дані параметри впливають на ефективність сонячних батарей.

Основним чинником, що приводять до генерації дефектів, є додаткове введення шкідливих домішок. Високотемпературні технологічні операції являються причиною деградації фотоелектричних параметрів Si, їх використовують в мікроелектронній технології та у технології виробництва сонячних елементів.

Щоб зменшити ціну на кремнієві елементи, перспективним є використання відносно недорогого, але меншої якості, тобто, невисокої вартості мікроелектронний та «сонячний» Si, матеріалу, який містить досить значну концентрацію домішок. Слід розробити технологію для удосконалення його характеристик. Ця технологія дала би можливість покращити фотоелектричні параметри пластин Si та розробити високосвітлочутливий матеріал, придатний для виробництва Si та інших світлочутливих напівпровідникових пристроїв. Це можна зробити методами, які видаляють небажані домішки та дефекти з робочої поверхні та об'єму кремнієвих пластин на задній неробочій поверхні до або під час виготовлення СЕ. Вищезазначені методи можуть бути використані для відновлення фотоелектричних властивостей платини з відходів мікроелектронного виробництва. Дослідження та виготовлення даних пластин вимагає постійного проведення та контролю дослідів з різною початковою біографією, типом, концентрацією домішок, структурних дефектів [1].

Отже, ефективність дослідження та впровадження різних гетерних обробок при виробництві високоефективних напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії є важливою технологічною процедурою. В одній із технологій виготовлення сонячних елементів впроваджуються стандартні гетерні обробки. Ці процедури впроваджені в мікроелектронній промисловості та представлені як легування фосфором, нанесення фосфоро-силікатної оболонки, створення порушеного пласти на тильному боці пластини тощо [2,3].

При концентрації домішок, що є досить високою та перевищує розчинність при даній температурі, тоді в об'ємі пластини виникають мікро преципітати домішок. А при виготовленні зазначених зразків з'являється необхідність створення певних умов для їх розчину, перед генеруванням домішок, що входять до складу мікро преципітатів. Застосувавши у виробництві інтегральні мікросхеми (ІМС), появляється можливість ефективно покращити параметри деяких (приповерхневих) ділянок пластин.

Відповідно до вищезазначеного, питання мінімізації втрат ККД Si, зумовлених об'ємною та поверхневою рекомбінаціями, що поєднані з високим вмістом шкідливих домішок в Si, відповідає найважливішим потребам сучасності.

**Мета роботи:** визначення дифузійної довжини та часу життя носіїв заряду та її розподілу по площині пластин кремнію .

Відповідно до поставленої мети в роботі були заплановані завдання:

- на базі огляду та аналізу існуючих методик, які використовують фотоінжекцію для визначення дифузійної довжини і часу життя, вибрати відповідні методики вимірювання;
- обрати технологію створення алюмінієвих інжектуючих «активних» та пасивних контактів на поверхні пластин;
- виконати вимірювання дифузійної довжини та часу життя щонайменше у двох точках на поверхні монокристалу кремнію за допомогою експериментального стенду;
- оцінити придатність світлової смужки для вимірювання дифузійної довжини, так і визначення релаксаційного часу життя, складеної із 6 лінійно розташованих світлодіодів червоного діапазону;
- для визначення розподілу дифузійної довжини та часу життя використати різні комбінації контактних пар алюміній – кремній, які термічно напилені через маску;
- перевірити методику суміщеного одночасного вимірювання дифузійної довжини і часу життя в одному циклі.
- відповідно до результатів вимірювань, виконаних на експериментальному стенді, зробити висновок про відповідність суміщеної методики, виявити її недоліки та запропонувати шляхи їх подолання.

**Об'єктом дослідження** є пластини монокристалічного кремнію, призначені для виготовлення фотоперетворювачів.

**Актуальність** обов'язковою процедурою виготовлення перетворювачів сонячної енергії в електричну є визначення найважливіших електрофізичних

параметрів, таких як дифузійна довжина, час життя та коефіцієнт дифузії для високоефективних фотоперетворювачів.

**Методики дослідження** вищевказані електрофізичні параметри зазвичай визначаються кожен окремо, недоліком є те, що умови за яких визначаються вищевказані параметри різні, такі параметри, як дифузійна довжина і час життя дають можливість розрахувати коефіцієнт дифузії нерівноважних носіїв заряду.

**Наукова новизна одержаних результатів** в дисертації розглядається суміщений метод визначення дифузійної довжини і часу життя з використання фото інжекції нерівноважних носіїв заряду, як для визначення дифузійної довжини так і для визначення часу життя. Відомі з літератури методи визначення часу життя і дифузійної довжини не залежні по умовам вимірювання фото інжекційним методом, оскільки ці фізичні параметри залежать від рівня інжекції та спектральних характеристик світлового потоку.

## **РОЗДІЛ 1. ДИФУЗІЙНА ДОВЖИНА, ЧАС ЖИТТЯ ТА ЇХ ЗНАЧЕННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ**

### **1.1. Релаксаційна характеристика часу життя та визначення дифузійної довжини, як параметру дифузійного процесу**

Сонячні батареї відіграють важливу роль у вирішенні енергетичного попиту, зважаючи на постійні дослідження та досягнення значних результатів в галузі сонячної енергії, а також на постійний попит на альтернативні джерела палива. По всьому світу було проведено ряд науково-дослідних заходів з підвищення ефективності сонячних модулів для подолання енергетичної кризи.

Безліч сонячних батарей (їх ще називають фотоелектричними елементами) утворюють фотоелектричне сонячне поле. Сонячні батареї - це компоненти фотоелектричних елементів, які перетворюють світло від сонячної енергії в електрику, яку використовують як джерело живлення електричних приладів, для обігріву, охолодження житлових будинків та підприємств. Сонячні панелі містять матеріали з напівпровідниковими властивостями, у них електрони збуджуються і перетворюються в електрику при падінні на них сонячного світла. Існує багато варіантів сонячного обладнання, але найбільш поширеними є два типи кристалічного кремнію (як монокристалічного, так і полікристалічного) [1,2]. Більшість сонячних модулів, що представлені сьогодні на ринку, виготовлені з певного типу кремнію - 90% усіх сонячних батарей є кремній. Проте, кремній має можливість приймати багато різних форм. Модифікації сильно відрізняються в чистоті кремнію; чистота в цьому сенсі - один із способів вирівнювання кремнієвих модулів. Чим вище чистота молекул кремнію, тим ефективніше сонячна панель перетворює сонячне світло в електрику. Більшість кремнієвих сонячних батарей виготовлені з кристалічного кремнію, їх відсоток складає близько 95, що робить їх найпоширенішим типом сонячних батарей [1,3].

Важливим параметром, що характеризує придатність матеріалу з якого виготовляють ефективні СЕ - це дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду  $L_D$  в Si.

Зазначимо, що дифузійна довжина – це відстань, на якій концентрація дифундуючих нерівноважних неосновних носіїв заряду буде зменшується у  $e$  – рази в 2,7 рази [2].

Уявимо напівпровідник, в якому були створені носії заряду дисбалансу внаслідок впливу факторів зовнішнього збудження. У даному випадку концентрації нерівноважних електронів і дірок являються функціями координат простору та часу  $n(x, y, z, t)$  і  $p(x, y, z, t)$ , а швидкість їх зміни виражаються рівняннями неперервності. Отримаємо рівняння безперервності для одновимірного однорідного зразка, в якому концентрація електронів змінюється тільки на осі  $x$ , як показано на малюнку 1.1. Виділяємо в напівпровіднику пласт товщиною  $dx$  і перетином  $1\text{см}^2$ . Об'єм даного пласту чисельно дорівнює  $dx$ . Візьмемо за припущення, що в момент часу  $t$  насиченість електронів була  $n(x, t)$  у обсязі  $dx$  відповідно  $n(x, t) dx$ , у момент часу  $t + dt$  буде  $n(x, t + dt) dx$  та зміна насиченість електронів за час  $dt$  у обсязі  $dx$  буде склади[3]:

$$n(x, t + dt) dx - n(x, t) dx = \frac{\partial n}{\partial t} dx dt, \quad (1.1)$$

Відповідна зміна концентрації електронів відбувається у результаті процесів генерації, рекомбінації, дифузії та дрейфу носіїв заряду. Проаналізуємо ці процеси.

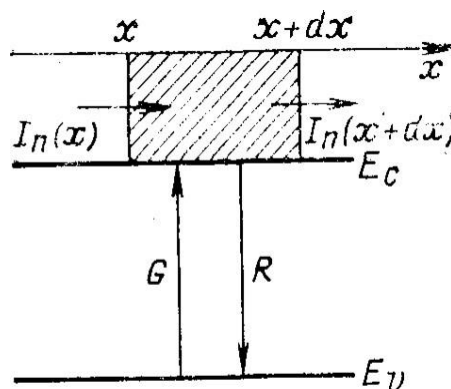


Рисунок 1.1 - Рівняння безперервності [4]

1. Під процесом генерації розуміють усі механізми, за допомогою яких електрони у валентній зоні можуть збуджуватися при локальних домішкових рівнях або ступенях адгезії і переноситися в зону провідності. У вищезазначених випадках генерація вільних носіїв заряду повинна враховуватися як за допомогою та результату теплових процесів, так й від усіх зовнішніх впливів. Зовнішні впливи включають вплив світла, випромінювання тощо. Позначаємо дані механізми  $G$ . Припустимо, що у випадку збудження електронів відбувається через внутрішнє (власне) поглинання світла напівпровідником. Швидкість генерації  $G$  визначає кількість пар електрон-дірка, вона виникає за 1 часу в 1 об'єму. Тоді, в інтервалі  $dx$  за час  $dt$  будуть створені електрони в необхідній кількості [4]:

$$Gdxdt \quad (1.2)$$

2. Зміна насиченості носіїв заряду на відрізьку  $dx$  здійснюється і у результаті рекомбінації. Стрімкість рекомбінації  $R$  – кількість пар електрон- дірок, що рекомбінуються в одиниці об'єму за одиницю часу. У випадку лінійної рекомбінації, якщо  $\tau_n$  - час життя нерівноважних електронів не залежить від насиченості нерівноважних носіїв заряду  $\Delta n = n - n_0$ , зміна кількості електронів завдяки рекомбінації в обсязі  $dx$  за час  $dt$  буде складати:

$$Rdxdt = - \left( \frac{dn}{dt} \right)_r dxdt = \frac{n - n_0}{\tau_n} dxdt \quad (1.3)$$

3. Зміна кількості носіїв заряду у об'ємі  $dx$  ймовірно обумовлено, також, процесами дифузії та дрейфу. Коли  $I_n(x, t)$  – це потік електронів, що проходять через  $1 \text{ см}^2$  площини за 1 сек, то за час  $dt$  через кордон прошарку  $x$  в обсяг увійдуть електрони у кількості  $I_n(x, t) dt$ , тому позначаємо границю  $x+dx$ , де й виходить  $I_n(x+dx, t) dt$  електронів. Зазначимо, що зміна числа електронів за час  $dt$  у величені  $dx$ , тому різниці даних потоків дорівнюватиме:

$$I_n(x, t) dt - I_n(x + dx, t) dt = -\frac{dI_n}{dx} dx dt \quad (1.4)$$

Повна зміна насиченості електронів в об'ємі  $dx$  за час  $dt$  складає величину:

$$\frac{\partial n}{\partial t} dx dt = g dx dt - \frac{\partial I_n}{\partial x} dx dt - \frac{n - n_0}{\tau_n} dx dt \quad (1.5)$$

звідки:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\partial I_n}{\partial x} - \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) називають формулою неперервності для електронів. Однотипне рівняння неперервності для дірок позначається у вигляді:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{\partial I_p}{\partial x} - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (1.7)$$

Потоки електронів  $I_n$  дірок  $I_p$  подаємо через щільність струму, що із врахуванням знаку носія будуть рівні:  $j_n = -en$  та  $j_p = ep$ .

Якщо щільність носіїв заряду являється функціями координат  $(x, y, z)$ , формула безперервності представлена через відповідність щільності струмів у спосіб:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_n - \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_p - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (1.9)$$

де,

$$\operatorname{div} j = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z}$$

Через те що, концентрації електронів  $n$  та дірок  $p$  не трансформуються у часі  $\partial n / \partial t = \partial p / \partial t = 0$   $\partial n / \partial t = \bar{p} \partial$ , то рівняння безперервності у одновимірному випадку мають вигляд:

$$-\frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} = g - \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{e} \frac{\partial j_p}{\partial x} = g - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (1.11)$$

Вищезазначені рівняння (1.10) та (1.11) зумовлює умови збереження кількості носіїв заряду. Тому, у стаціонарному стані струм носіїв, що виходять з об'єму, дорівнює кількості носіїв, що утворюються при зовнішньому збудженні за вирахуванням носіїв, що поєднуються у всьому обсязі.

#### Дифузійний і дрейфовий струми

Дослідимо неоднорідний напівпровідник, в якому щільність електронів  $n(r)$  та отвори  $p(r)$  постійно змінюються від точки до точки. причини гетерогенний напівпровідник повинен виробляти розсіяний струм електронів і дірок, що визначається дифузією носіїв області, у якій їх концентрація вища, чим в області з меншою концентрації.

Наприклад, у напівпровіднику щільність носія заряду зростає у напрямку осі  $x$ , як показано рисунку 1.2 [4].

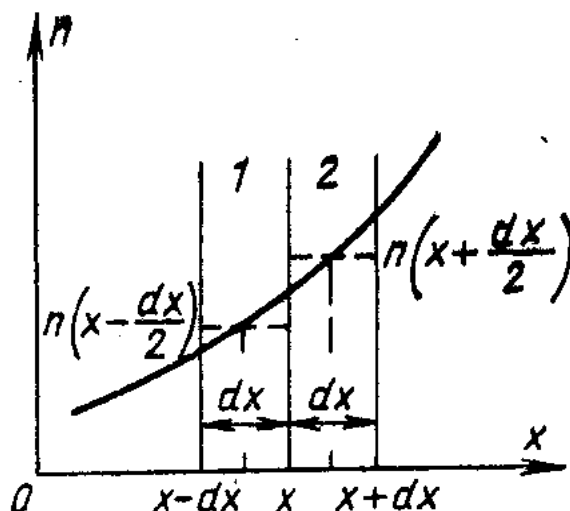


Рисунок 1.2 - Графік розрахунку градієнту концентрації носіїв заряду [4]

Накреслимо точку  $x$  площину, що є перпендикулярною до осі  $x$  та прослідкуємо рух носіїв заряду в прошарках 1 і 2 товщиною  $dx$  (справа і зліва від цієї площини); внаслідок хаотичного руху носія заряду: залишать прошарок 1, але там якщо кожен електрон може рухатися праворуч і ліворуч з однаковою ймовірністю, половина переходить від шару 1 до шару 2. Однак, зважаючи, що кількість електронів у шарі 2 більше, ніж в 1, то зворотний потік електронів буде більш прямим. Коли,  $n\left(x - \frac{dx}{2}\right)$  середня концентрація електронів поверхні  $n\left(x + \frac{dx}{2}\right)$  - поверхня 2, то різниця щільності електронів у даній поверхності дорівнює:

$$n\left(x - \frac{dx}{2}\right) - n\left(x + \frac{dx}{2}\right) = -\frac{dn}{dx} dx \quad (1.12)$$

Відповідно до формули (1.12) різниця щільності електронів пропорційна градієнту їх концентрації, отже, і потік електронів  $I_n$ , що сформувався в результаті дифузії у напрямках  $x$ , має вигляд пропорційний градієнту концентрації електронів у даному напрямку. Записуємо:

$$I_n = -D_n \frac{dn}{dx} \quad (1.13)$$

де  $D_n$  - коефіцієнт дифузії електронів.

Відповідно зазначаємо дифузний потік дірок:

$$I_p = -D_p \frac{dp}{dx} \quad (1.14)$$

де  $D_p$  - коефіцієнт дифузії дірок.

Як випливає з рівнянь (1.14) і (1.13), потоки електронів і дірок, направляються у бік менших концентрацій носіїв заряду, тощо. Дифузійним потоком носіїв заряду відносяться дифузійні струми електронів  $J_{ndиф}$  та дірок  $J_{pдиф}$ :

$$j_{ndиф} = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (1.15)$$

$$j_{pдиф} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.16)$$

У випадку, коли  $n$  і  $p$  – це функції координат ( $x, y, z$ ), розсіяний струм у векторній формі має такий вигляд для електронів:

$$j_{ndиф} = eD_n \text{grad}n(r) \quad (1.17)$$

Вид для дірок:

$$j_{pдиф} = -eD_p \text{grad}p(r) \quad (1.18)$$

Розсіяний струм, що виникає за наявності градієнта концентрації носія заряду, призводить до просторового поділу зарядів, створюючи статичне електричне поле, яке генерує струми дрейфу електронів і дірок. За допомогою термодинамічної рівноваги у кожній точці напівпровідника дрейфовий струм вирівнює дифузний струм так, що загальний струм дорівнює нулю.

Візьмемо до уваги, неоднорідний напівпровідник знаходиться у зовнішньому постійному електричному полі напруженості  $\mathcal{E}$ . Нижче цього поля електрони і дірки рухаються в напрямку, в результаті чого виникають струми електронів і дірок. Коли зовнішнє електричне поле слабке і тип руху носіїв не змінюється, компоненти дрейфу щільності струму записуються на підставі закону Ома у такій формі:

$$j_{n\text{др}} = en\mu_n \mathcal{E} \quad (1.19)$$

$$j_{p\text{др}} = ep\mu_p \mathcal{E}$$

Абсолютний струм буде складатися як з дифузійного, так і дрейфового струмів. Отже, для електронів і дірок він буде дорівнює:

$$j_n = j_{n\text{др}} + j_{n\text{диф}} = en\mu_n \mathcal{E} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (1.20)$$

$$j_p = j_{p\text{др}} + j_{p\text{диф}} = ep\mu_p \mathcal{E} + eD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.21)$$

Звідки, щільність загального струму  $j$  у довільній точці неоднорідного напівпровідника у довільній час буде визначатися формулою:

$$j = j_p + j_n = e(p\mu_p + n\mu_n)\mathcal{E} + e\left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}\right) \quad (1.22)$$

Дифузійний струм суттєвий тільки в напівпровідниках. Це пояснюється тим, що концентрація електронів і дірок у напівпровідниках може сильно змінюватися при постійній загальній концентрації заряду. У металах концентрація електронів майже постійна. ( $\tau = 1/\alpha$  — час життя надмірних носіїв у напівпровіднику. Протягом часу  $t = \tau$  концентрація надмірних носіїв зменшується в  $e$  разів. Для виготовлення

напівпровідникових приладів на основі германію та кремнію використовують кристали, час життя яких має значення 10 – 100 мкс.)[3].

#### Співвідношення Ейнштейна

У гетерогенному напівпровіднику струм у термодинамічній рівновазі дорівнює нулю, тобто  $j = j_n + j_p = 0$ . В такому випадку лінійні струми вирівнюють дифузійні струми, та на основі рівняння (1.21) для електронів, визначаємо [4]:

$$n\mu_n \mathcal{E}_{cm} = -D_n \frac{dn}{dx} \quad (1.23)$$

Коли, напівпровідник має статичне електричне поле  $\mathcal{E}_{cm}$ , то його електрони, що знаходяться у даному полі, будуть мати потенційну енергію  $U = -e\varphi$ :

$$-\mu_n n_0 e^{\frac{e\varphi}{k_0 T}} \frac{d\varphi}{dx} = -D_n \frac{e}{k_0 T} n_0 e^{\frac{e\varphi}{k_0 T}} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.24)$$

Тобто, для електронів отримаємо рівняння:

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{k_0 T} \quad (1.25)$$

Рівняння для дірок:

$$\frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{k_0 T} \quad (1.26)$$

Вираз, який пов'язує коефіцієнт дифузії носіїв заряду, що відповідає статистиці Максвелла, з їх рухливістю дрейфу в термодинамічній рівновазі називається співвідношенням Ейнштейна.

Коефіцієнт Ейнштейна застосовують до нерівноважних носіїв заряду. Так само, як нерівноважні носії обмінюються енергією з решіткою за короткий час, не кажучи вже за життя, вони потрапляють у теплову рівновагу з решіткою, і їх розподіл енергії не відрізняється від розподілу рівноважних носіїв заряду через відсутність виродження.

Проаналізуємо дифузію та дрейф неосновних надлишкових носіїв заряду у домішковому напівпровіднику відповідно зовнішнього однорідного електричного поля напруженістю  $\mathcal{E}$ .

Припустимо, що є напівпровідник  $p$ : типу ( $n_0$  та  $p_0$ ), поперечна величина якого значно менше його довжини. Найвужча область напівпровідника  $-l \leq x \leq 0$  освітлюється світлом, відповідно щоб у всьому обсязі освітленій області взірця відбувалася рівномірна генерація електронів так і дірок, як показано на рисунку 1.3. Припустимо, що щільність основних носіїв заряду  $p_0$  велика у зрівнянні із надмірною концентрацією неосновних носіїв заряду  $\Delta n$ , час життя яких  $\tau_n$ . Прикладемо до зразка однорідне електричне поле  $\mathcal{E}$ . Зробимо це так, щоб вказані носії могли дрейфувати та дифундувати у неосвітлену область всього зразка [5].

У освітленій області електронного напівпровідника, в якій руйнуються надлишки електронів та дірок  $\Delta n = \Delta p$ , концентрація нерівноважних дірок набагато більша, ніж їх концентрація в освітленій частині зразка. Через градієнт концентрації дірок відбувається дифузія. У частині зразка, що неосвітлюється, в якій дірки дифундують, виникає об'ємно позитивний заряд і порушується електронейтральність зразка. Це об'ємний заряд - статичне електричне поле, яке компенсується зарядною частиною заряду. Повна компенсація об'ємного заряду відбувається, коли концентрація надлишкового електрона дорівнює концентрації надлишкових дірок у будь-якій точці зразка. Таким чином, електронні напівпровідники глибоко дифундують, так що не утворюється об'ємний заряд, і їх дифузія відбувається як дифузія квазінейтральних частинок. У міру просування напівпровідника надлишки отворів і електронів рекомбінуються, а їх концентрація зменшується з відстанню.

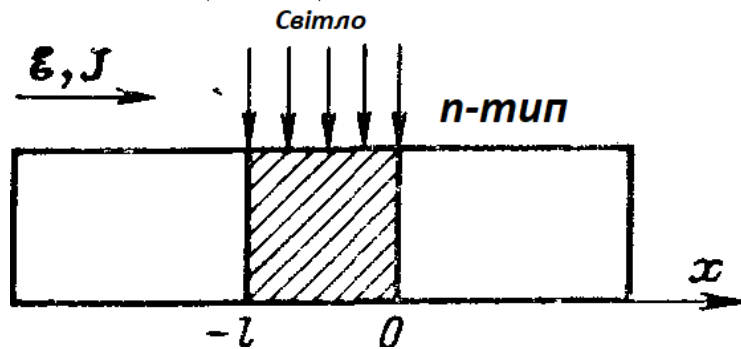


Рисунок 1.3 - Модель напівпровідникового зразка [4,14]

З полем, що прискорюється, електрони затягують за собою і дірки, а коли поле сповільнює електрони, основні заряди перерозподіляються. Тому у зовнішньому електричному полі n-матеріалу квазінейтральна хмара нерівноважних носіїв рухається у напрямку надлишкових дірок зі швидкістю дрейфу неосновних носіїв.

Щільність надлишків дірок  $\Delta n$  можна визначити, вирішивши рівняння безперервності:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + \frac{1}{e} + \frac{\partial j_n}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1.27)$$

Рішення цього рівняння для стаціонарного випадку, коли  $\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = 0$  у неосвітленій частині напівпровідника ( $g = 0$ ):

$$D_n \frac{d^2}{dx^2} \Delta n + \mu_n \mathcal{E} \frac{d}{dx} \Delta n - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \quad (1.28)$$

Позначення:

$$L_D = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (1.29)$$

$$L_\mathcal{E} = \tau_n \mu_n \mathcal{E} \quad (1.30)$$

Рішенням рівняння буде вираз:

$$\Delta n = C_1 e^{\alpha_1 x} + C_2 e^{\alpha_2 x} \quad (1.31)$$

Зважаючи на зменшення концентрації неосновних нерівноважних носіїв заряду у мірі віддалення від освітленої області зразка, розрахуємо та отримуємо:

При  $x \geq 0$

$$\Delta n = C_1 e^{-\frac{x}{L_1}} \quad (1.32)$$

При  $x \leq -l$

$$\Delta n = C_2 e^{\frac{x}{L_2}} \quad (1.33)$$

Отже, на двох сторонах від освітленої області зразка концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду зменшується за експоненціальним законом з постійним спадом  $L_1$  і  $L_2$ , її називають довжиною затягування.

За недостатністю електричного поля, як  $L_E = \mu_n \tau_n$ ,  $\mathcal{E} = 0$ . Даний вираз вказує, що експонентний спад щільності надлишкових неосновних носіїв заряду, обумовлений рекомбінацією, стане симетричним по обидві сторони від освітленої частини зразка та розраховується величиною  $L_D = \sqrt{D_n \tau_n}$ , а саме дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду – у нашому випадку електронів.  $L_D$  -  $L_p$  є середня відстань, при якій відбувається зміщення нерівноважних дірок при дифузії за час життя. За відсутності зовнішнього електричного поля велика концентрація дірок у результаті рекомбінації стане змінюватися із відстанню по експонентному закону.

За величиною внутрішнього електричного поля  $\mathcal{E} \neq 0$  при постійних спадах  $L_1$  і  $L_2$  будуть відрізнятися від дифузійної довжини  $L_D$ . Та у залежності від напрямлення електричного поля.

$$L_1|_{\varepsilon>0} = \frac{2L_D}{\sqrt{L_\varepsilon^2 + 4L_D^2 + L_\varepsilon}} < L_D|_{\varepsilon=0} < \frac{2L_D}{\sqrt{L_\varepsilon^2 + 4L_D^2 + L_\varepsilon}} = L_2|_{\varepsilon<0} \quad (1.34)$$

Дифузійна довжина вздовж поля має формат  $L_1$  і  $L_2$

Розглянемо рисунок 1.4, на якому зображено розподіл нерівноважних носіїв заряду при відсутності та наявності зовнішнього електричного поля[6]:

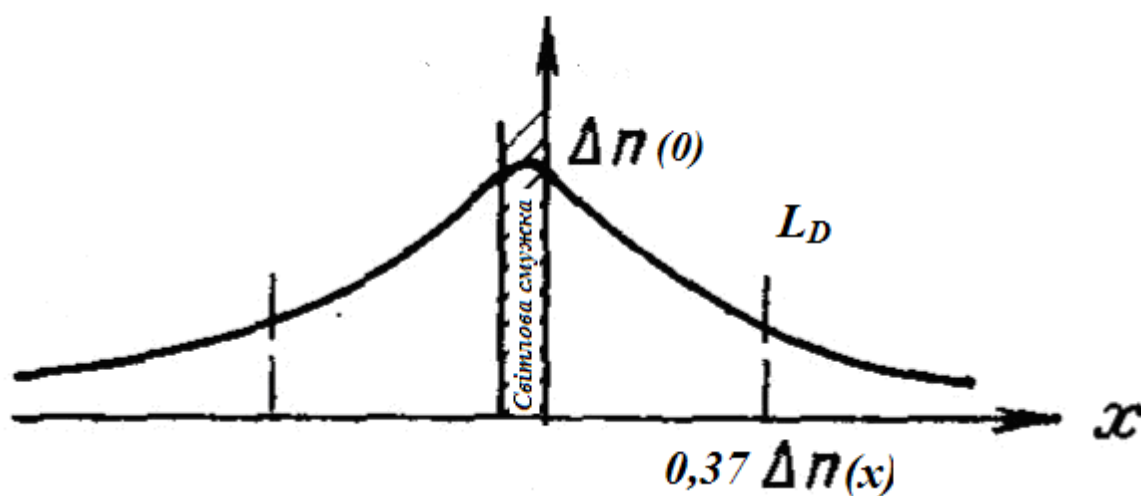


Рисунок 1.4 – Графік розподілу концентрації нерівноважних носіїв заряду вздовж зразка, створена світловою смужкою[6]

Час життя, це параметр, який тісно пов'язаний із рекомбінаційними процесами.

Рекомбінація носіїв може відбуватися не тільки в об'ємі, але й на поверхні напівпровідника, причому остання часто має більш суттєве значення. Це пояснюється тим, що на поверхні напівпровідника завжди є різні дефекти ґратки, а також оксидні плівки й адсорбовані гази, які можуть утворювати велику кількість уловлювачів, які викликають інтенсивний процес рекомбінації носіїв. Роль поверхневої рекомбінації тим вища, чим більше відношення площі поверхні до об'єму зразка. Поверхневі процеси характеризуються швидкістю поверхневої рекомбінації  $RS$  і часом життя носіїв на поверхні  $\tau S$ . На відміну від швидкості об'ємної рекомбінації  $RV$ , яка характеризується кількістю носіїв, що рекомбінують

за одиницю часу, коефіцієнт  $RS$  показує, з якою швидкістю носії рухаються з об'єму до поверхні та вимірюється в сантиметрах за секунду (см/с). На практиці для аналізу та розрахунку напівпровідникових приладів використовують єдиний параметр — ефективний час життя  $\tau$ , який характеризує сумісний вплив об'ємної та поверхневої рекомбінацій:  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  (1.44) Ефективний час життя носіїв заряду у напівпровідникових приладах зазвичай має значення 0,1...2 нс, але може бути на порядок більшим або меншим від цієї величини [3,14].

## 1.2. Методи прямого незалежного визначення дифузійної довжини та часу життя в пластинах кремнію

Нестационарні методи вимірювання часу життя умовно можна розділити на дві групи. Перша група - це методи, в яких вимірюється тимчасове загасання надлишкової концентрації носіїв струму після початкової інжекції. До другої групи належать фазові методи, у них використовується ефект фазового зсуву відповідно між сигналом фотопровідності і відповідним сигналом генерації носіїв заряду.

Для зручності викладу ми будемо називати першу групу нестационарних методів вимірювання часу життя фотоелектричними методами.

### Метод загасання фотопровідності

Основним фотоелектричним методом є метод загасання фотопровідності, сутність якого полягає в наступному. Візьмемо пластину і через неї напівпровідника пропускають струм у режимі генератора струму. У момент часу  $t < 0$  платівка висвітлюється коротким імпульсом світла за допомогою лампи-спалаху або іскри від розряду конденсатора. Після освітлення введені у зразок нерівноважні носії рекомбінують у обсязі і на поверхні напівпровідника. Досліджуючи закон загасання фотопровідності на пластинах різної товщини і при різній обробці поверхні, можна визначити час життя і швидкість поверхневої рекомбінації [8].

Фотоелектричні методи зручні для вимірювань тим, що порушення надлишкових носіїв в напівпровіднику і визначення загасання провідності з часом здійснюються по роздільним каналам. Таким чином, виключається труднощі

захисту чутливого підсилювача від інжектується імпульсу з великою амплітудою, а також немає необхідності приготування контактів з особливими фізичними властивостями.

Надлишкові носії генеруються за допомогою короткого імпульсу світла. Джерелом імпульсів є або газорозрядна ксенонова лампа високого тиску, або імпульсна лампа для фотоспалаху. З'явилися в результаті освітлення фотоактивним світлом надлишкові носії зменшують опір зразка. Вимірювання проводять в режимі, коли струм в ланцюзі не змінюється. Для цього опір навантаження вибирають багато більше опору зразка. Після закінчення світлового імпульсу носії рекомбінують, в найпростішому випадку за експоненціальним законом, тому ж закону змінюється падіння напруги на зразку з часом. Для підвищення точності і зручності вимірювань застосовують компенсацію сигналу від зразка експонентою, одержуваної від допоміжного фотоелемента в якості навантаження. Величину часу життя  $\tau$  відраховують по каліброваною шкалою. Мінімальна величина вимірюваного  $\tau$  обмежується часом загасання світлових імпульсів. У ламп для фотоспалаху воно становить близько 1 мксек. При вимірах необхідно стежити, щоб світло не потрапляло на контакти, так як в цьому випадку можна отримати помилкові значення  $\tau$  через виникнення фото-е.р.с. на контактах. Освітлення зразка вузької світлової смужкою дає можливість визначити рівномірність (однорідність) його за часом життя. Зрозуміло, що і в цьому випадку вимірюється ефективно час життя[9].

В японській установці (типу ГМ-ЗА) можна вимірювати час життя на злитках, використовуючи ємнісні контакти. Через зразок пропускають струм високої частоти. Напруга фотопровідності підсилюється попереднім підсилювачем, детектується, після чого сигнал розглядають на екрані осцилографа. Установка дозволяє вимірювати часи життя від 10 мксек і вище на злитках діам. - 20 мм, що мають питомий опір не нижче 10 ом-см.

При вимірах необхідно виконувати такі умови:

1) величина електричного поля в зразку не повинна бути занадто велика ( $E < 5$  в / см). Ця умова особливо істотно при вимірюванні великих значень часу життя.

При сильних полях нерівноважні носії можуть витягуватися через торцеві контакти, а також розсмоктуватися з підвищеною швидкістю внаслідок дрейфу;

2) відстань від країв смуги освітлення до контактів має становити кілька дифузійних довжин;

3) необхідна постійна підсвічування зразка для виключення впливу рівнів прилипання;

4) на кривій загасання необхідно вибирати експонентний ділянку, віддалений від початку кривої принаймні на  $2\tau$ . Використовуючи тауметр або експонентну розгортку, можна ефективно контролювати порушення експоненціального затухання.

Метод загасання фотопроводимости дозволяє вимірювати час життя носіїв заряду на пластинах германію та кремнію в межах від декількох мікросекунд до 1,5-2,0 мсек і швидкість поверхневої рекомбінації в іролеліх від 5 см/сек до 1000-10000 см/сек з точністю  $\sim 20\%$ .) [9].

Розглянемо стаціонарні методи. Даний метод вимірювання дифузійної довжини, заснований на використанні рухомого світлового зонда, а також методі вимірювання фотоелектромагнітного ефекту й стаціонарної фотопровідності.

Опишемо метод рухомого світлового променя [6]. Сутність даного методу полягає у наступному: поверхня напівпровідника пластина (спеціально виготовлений кристал чи торець злитка) буде освітлюватися вузькою смужкою світла (світловий зонд) у точці  $x = 0$ . На відповідній відстані від смужки світла буде знаходитися бар'єрний колекторний контакт. Вимірюється фото - ЕРС, який виникає між колекторним контактом і неосвітленою частиною зразка, а величина фото ЕРС із-за малих рівнів світлової генерації  $U \ll k_B T/q$  прямо пропорційна концентрації даних нерівноважних носіїв заряду у області колектора.

Носії заряду, що генеруються у області освітлення, дифундують повздовж зразка. Перемістивши світловий зонд по довжині зразка, нами отримано залежність:

$$U_{\text{фото ЕРС}} = f(x) \quad (1.35)$$

де  $x$  – відстань від краю світлової смужки до колекторного контакту.

Мінусом цього способу є те, що при висвітленні тонкої світлої смуги зразка, товщина якої менша за довжину, завиміряне значення дифузійної довжини значно зменшується за рахунок впливу швидкості поверхневої рекомбінації.

Метод зонду рухомого світла має ряд модифікацій, які широко використовуються в дослідницьких цілях тощо [7]. Збудження носіїв заряду може відбуватися з точковою світловою точкою, і можна вважати, що надлишкова концентрація носіїв заряду є функцією радіальної відстані  $r$  (сферична симетрія). У точковому джерелі світла концентрація надлишкових носіїв заряду низька, так що коло навколо контакту можна використовувати для його збільшення. Для досить великого радіуса  $r$  маємо рівняння  $U_{фЕР C} = const \exp(-r/L)$ .

Цей метод вимірювання поки не широко поширений, оскільки не має великих переваг перед описаним вище методом, але технічно є більш складним.

Більш поширений метод швидкого рухомого світлового променя. Сутність даного методу полягає: в тому, що промінь світла, який рухається з постійною швидкістю вздовж світлочутливої поверхні кристала, на який падає металевий зонд (колектор) на зразок. У освітленій області створюються надлишкові носії заряду, які дифундують у неосвітлену область зі швидкістю дифузії:

$$V_{\phi} = \frac{L}{\tau} \quad (1.36)$$

Функції розподілу носіїв заряду по об'єму, у разі рухомої світлової плями, неосвітленого кристалу мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} p(x) = const \exp(-x/L_1); \\ \\ p(x) = const \exp(-x/L_2). \end{array} \right. \quad (1.37)$$

Функція  $p(x)$  буде визначається експериментально – вимірюється фото ЕРС, яка виникає під дією світла на колекторі.

Відповідно значень постійних  $L_1$  та  $L_2$ , які будемо знаходити експериментально, можна розрахувати час життя за допомогою наступної рівняння [2]:

$$\tau = \frac{L_1 - L_2}{V_\phi}. \quad (1.38)$$

Зазвичай,  $L_1$  та  $L_2$  знаходять відповідно по нахилу прямих  $\ln p = f(x)$ . Тому що,  $x$  змінюється у часі із рухом світлової плями, тож за горизонтальну вісь можна прийняти вісь часу, та розрахунок провести виходячи із графіка  $\ln p = f(t)$ . Взаємний зв'язок у даному випадку набуває такого вигляду:

$$\tau = \left( \frac{1}{\Delta \ln p_1} - \frac{1}{\Delta \ln p_2} \right) \Delta t \quad (1.39)$$

Одним із перетворень методу рухомого зонду є спосіб з'єднання трьох контактів до форми паралелепіпеда: два на кінцях та один посередині. Взірець міститься в схемі моста: центральний контакт з'єднаний діагоналлю моста, а дві половини зразка служать плечима моста. Даний міст врівноважується, а потім освітлюється половиною зразка вузькою смугою світла, що виводить міст з рівноваги. Однак, можна знайти положення світлового зонда, який врівноважує міст. Знаючи цю відстань від зонда до середнього контакту, можна визначити час життя. У цього методу є свої обмеження, оскільки він використовується для зразків з терміном експлуатації не менше 10 мкс.

Розглянемо методи стаціонарної фотопровідності. Даний метод використовується для визначення малих значень часу життя у разі об'ємного збудження [8].

Переглянемо умови об'ємного збудження  $kL < 1$ ,  $kd < 1$ . Якщо  $d/L \gg 1$ , то з теорії випливає, що:

$$\delta p_{cp} = g\tau \quad (1.40)$$

де  $g$  – швидкість (темп) об'ємної генерації пар.

Розглянувши тонкі зразки  $d/L \ll 1$  за високої швидкості при поверхневій рекомбінації на обох сторонах пластини [2] :

$$\delta p_{cp} = g \left( \frac{d^2}{12D} \right) \quad (1.41)$$

Порівнюючи величину фотовідповідності досліджуваного зразка, який має невелике значення часу життя з фотовідповідністю еталонного зразка, є можливість знайти величину швидкості об'ємної генерації та часу життя  $\tau$ .

Визначення часу життя за допомогою фото електромагнітного ефекту (ФЕМ - ефекту) [8]. Сутність методу ефекту ФЕМ полягає в наступному: напівпровідникова пластинка освітлюється світловими променями, що створюють поверхнєве генерування носіїв заряду. Розміщується в магнітному полі пластинка, силові лінії якого перпендикулярні довжині зразка та напрямку світлового потоку. Розсіюючись у бік не освітленої сторони, пара носіїв - електрони та дірки - створюють ефект ФЕМ. Отже, ефект ФЕМ - це ефект Холла, при якому носії надлишку заряду генеруються світлом. ФЕМ напруга - ефект обумовлений впливом сили Лоренца на дифузійний потік носіїв заряду. В міру проходження носіїв в глибину зразка відбувається їх рекомбінація. При наявності магнітного поля носії заряду, що вводяться світлом, відхиляються в сторону, перпендикулярну до магнітного поля, а й до світла. Результатом напруги є фото гальванічного ефекту  $U_{ФЕМ}$ , який описується співвідношенням низької інтенсивності світла та низькою швидкістю рекомбінації поверхні:

$$U_{\text{ФЕМ}} = J \cdot l \frac{H}{Nd} \cdot \frac{(\mu_n + \mu_p)L}{\mu_n}, \quad (1.42)$$

де  $N = p - n$ ;

$H$  – напруга магнітного поля;

$d$  – товщина зразка;

$l$  – довжина освітленої частини зразка або відстань між зондами;

$L$  – дифузійна довжина.

З даного співвідношення можемо вирахувати величину  $L$ , коли відома інтенсивність світла  $J$ .  $U_{\text{ФЕМ}}$  не залежить від наявності у зразку рівнів прилипання, тому що, носії заряду, які знаходяться на даних рівнях прилипання не беруть участі у русі, отже, відповідно, не вносять вкладу у величину  $U_{\text{ФЕМ}}$ . При визначенні за допомогою ФЕМ – ефекту необхідні однорідні зразки прямокутної форми із спеціально виготовленими контактами.

Проведення вимірювання ФЕМ можна робити різними методами. В одному із них, вимірюють абсолютну величину ЕРС ФЕМ – ефекту та розрахунок роблять за допомогою формули [7]:

$$\tau = \frac{1}{D} \left( \frac{d \cdot 10}{GH(\mu_n + \mu_p)\rho} \right)^2 U_{\text{ФЕМ}}^2 \quad (1.43)$$

де  $U_{\text{ФЕМ}}$  – ЕРС ФЕМ;

$q$  – заряд електрона;

$A$  – швидкість поверхневої генерації пар;

$l$  – довжина освітленої частини зразка;

$G = qAl$  – це коефіцієнт, який визначається по еталонних зразках із-за відсутності захвату.

При вимірювання зразків із малим значенням часу життя неосновних носіїв час від часу спостерігають розходження між значеннями часу життя, замірними по

фото електромагнітному ефекту та фотопровідності. Дані відмінності пов'язані із тим, що метод ФЕМ дозволяє вимірювати час життя неосновних носіїв. Відповідно методу фотопровідності для напівпровідника  $n$  і  $p$  – типу вимірюється величина [3]:

$$\tau_{\text{ф.н.}} = \tau_n \frac{1 + \tau_p / b\tau_n}{1 + 1/b} \quad (1.44)$$

$$\tau_{\text{ф.н.}} = \tau_p \frac{1 + b\tau_n / \tau_p}{1 + b} \quad (1.45)$$

Припустимо, що  $\delta n = \delta p$ , величина  $\tau_{\text{ф.н.}} = \tau_{\text{неосн}}$ , при наявних центрах захоплення (прилипання),  $\delta n \neq \delta p$ . Припустимо, що у напівпровіднику  $n$ -типу на пастки захоплюється велика концентрація неосновних носіїв  $\delta p \ll \delta p_t$ , оскільки,  $\delta n = \delta p + \delta p_t$ , то маємо  $\delta n \gg \delta p$  та  $\tau_{\text{ф.н.}} \approx \tau_{\text{осн}} \gg \tau_{\text{неосн}}$ . Розглянутий процес захоплення стає істотним за низьких температур, оскільки за високих носії, захоплені пастками, викидаються назад у зону. Інтенсивне захоплення починається за температур нижче кімнатної - для германію, для кремнію це – нижче 100–150 °С.

Значну роль для вимірювання малих значень часу життя відіграє явище захоплення, тому що величина концентрації нерівноважних носіїв заряду дуже зменшується та стає рівнозначною з концентрацією центрів захоплення. При високих рівнях інжекції центри захвату повністю заповнюються носіями струму і не впливають на результати вимірювань. Даний метод визначення  $\tau$  по вимірюванню ФЕМ – ефекту широко використовується при дослідженні рекомбінаційних параметрів багатьох напівпровідників.

### 1.3. Рухома світлова смужка (метод Вальдеса)

Метод рухомого світлового зонда

Принцип даного методу полягає в тому, що вузька смуга світла, що падає на поверхню, звільняє пари електрон-дірка і концентрація неосновних носіїв струму вимірюється як функція відстані від місця звільнення. В якості детектуючого електроду неосновних носіїв струму служить зазвичай точковий контакт, до якого прикладено напругу у зворотному напрямку. Цей контакт знаходиться на відстані  $g$  від центру світлової плями і перпендикулярно до нього. Відстань вимірюється за допомогою мікрометричного гвинта. Падаюче світло переривається з низькою частотою, що дає можливість вимірювати фототок за допомогою змінного підсилювача і одночасно з тим виділяється і постійна складова струму. При досить низькій напрузі на колекторі струм пропорційний концентрації неосновних носіїв струму ( $U \ll k_B T/q$ ).

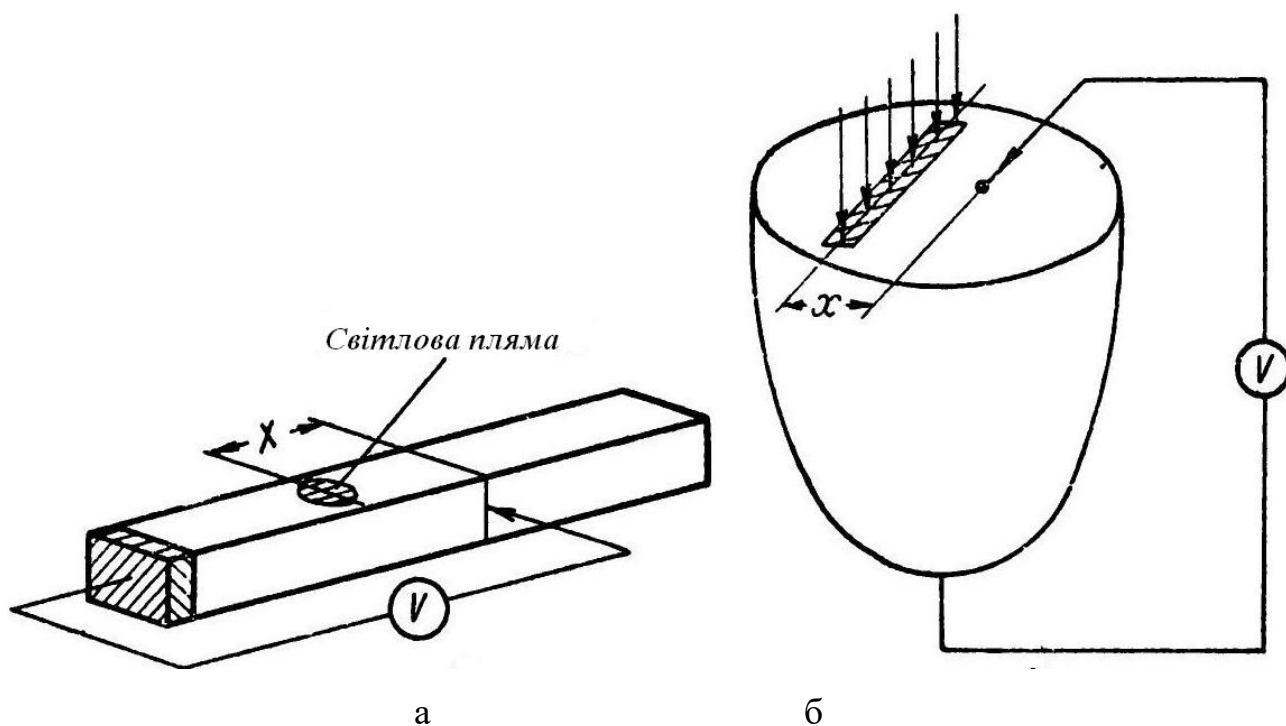


Рисунок 1.5- Метод рухомого світлового зонда: а — схема Гоучера;  
б — схема Вальдеса [9]

Носії надмірного заряду генеруються в області освітлення, що зображено на рисунку 1.5 і розсіюються вздовж зразка. Зміщуючи світлову пляму відносно зонда,

можна усунути залежність фото-ЕРС =  $f(x)$ , де  $x$  - відстань від краю світлової смуги до точки контакту.

При дослідженні тонкого однорідного зразка, який висвітлюється в кінці, проблема пошуку розподілу неосновних носіїв заряду в першому наближенні може розглядатися як одновимірна задача.

Рівняння:

$$\sigma_p = \sigma_p(0) e^{-x/L} \quad (1.46)$$

Версія методу Гоучера має низку обмежень, які майже повністю виключають можливість його практичного застосування. Торцеве освітлення недоцільно для зразка, товщина якого менша за довжину, і вимірюється величина дифузійної довжини, що значно зменшується за рахунок ефекту поверхневої рекомбінації. Тому у варіанті, запропонованому Мортонем, Хайнсом та Вальдесом, у подальшому застосовувався метод рухомого світлового зонда.

У цих методах обчислення проводять у разі напівнескінченного напівпровідника. Генерація носія відбувається у вигляді лінії на поверхні.

Просторовий розподіл надлишкових носіїв у напівпровіднику (для визначеності  $n$ -типу), можемо записати в циліндричних координатах та розглядати як радіальний потік, тобто:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right) - \frac{\Delta p}{D_p \tau} = 0 \quad (1.47)$$

Рішення цього рівняння має вигляд:

$$\Delta p(r) = \Delta p_0 i H_0^{(1)} \left( \frac{ir}{L_p} \right) \quad (1.48)$$

де 
$$L_p = \sqrt{D_p \tau}$$

$H_0^{(1)}$  - функція Ханкеля нульового порядку від уявного аргументу та відносно великого відношення  $r / L_p$  функція Ханкеля переходить у експонентну функцію даного аргументу:

$$iH_0^{(1)}\left(\frac{ir}{L_p}\right) \approx \exp\left(\frac{r}{L_p}\right) \quad (1.49)$$

Дана залежність існує лише при поверхневому збудженні носіїв надлишків заряду, низькій швидкості рекомбінації поверхні та підтриманні певних залежностей між розміром світлової смуги та відстані до точки контакту, що зображено на рисунку 1.6.

Виміри на асимптотичному відрізку кривої  $U_{ф.е.д.с.} = f(r)$  не робляться. Якщо  $r/L > 1$  і  $5\omega \leq r = l/4$  функція Ханкеля нульового порядку має виглядає:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = iH_0^{(1)}\left(\frac{ir}{L_p}\right) \approx \frac{\exp\left(\frac{r}{L_p}\right)}{\sqrt{\left(\frac{r}{L_p}\right)}} \quad (1.50)$$

Через високу концентрацію неосновних носіїв у зоні колектора порушується закон прямої пропорційності фото-ЕРС та концентрації.

Для усунення нелінійності колектора, Лашкар'єв [6] запропонував проводити вимірювання в режимі безперервної фото-ЕРС, тобто одночасно змінюючи відстань між світловою смугою та колектором та інтенсивністю світла одночасно  $U_{ф.е.д.с.} = const$ .

Отримаємо для одновимірного випадку розрахункові формули:

$$U_{ф.е.д.с.} = const = KJ_1 \exp\left(-\frac{x_1}{L}\right) = KJ_2 \exp\left(-\frac{x_2}{L}\right) \quad (1.51)$$

$$\frac{J_1}{J_2} = \exp\left(-\frac{x_2 - x_1}{L}\right), \quad \text{а} \quad L = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{J_1}{J_2}} \quad (1.52)$$

де  $J_1$  і  $J_2$ — інтенсивність світла в точках  $x_1$  і  $x_2$ .

Насамперед будується у напівлогарифмічному масштабі номограма теоретичних кривих, що розраховуються за формулою (1.50). крива, що досліджується поєднується з однією із теоретичних кривих до повного збігу, від якої визначається довжина дифузії  $L$ .

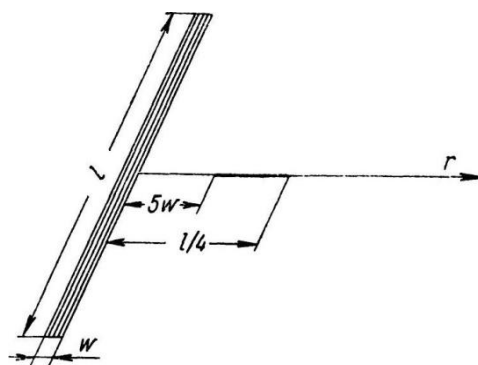


Рисунок 1.6 - Область вимірювань за методом Вальдеса [8]

## Висновки до розділу 1

В даному розділі розглянуто суттєві методи вимірювання дифузійної довжини та часу життя: стаціонарні та нестаціонарні. Проаналізувавши вищезазначені методи, було обрано фотоінжекцію для проведення дослідження відповідно до поставлених завдань. Для визначення часу життя та дифузійної довжини відали перевагу прямому незалежному методу дослідження - методу рухомої смужки (метод Вальдеса).

## РОЗДІЛ 2. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З РОБОТОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО СТЕНДУ ТА ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ПЛАСТИН КРЕМНІЮ

### 2.1. Будова та принцип дії вимірювальних стендів

#### Будова та принцип дії вимірювальних стендів

На теперішній час розроблено декілька зразків вимірювальних пристроїв, що дозволяють проводити вимірювання дифузійної довжини методом рухомого світлового зонда. На рисунку 2.1 поданий загальний вид першої установки «Жало», що застосовувалося для виробничого контролю параметрів пластин германію. Ця установка являє собою комбінованого типу: вона дає змогу вимірювати питомий опір, тип провідності та дифузійну довжину [9]. На практиці вона використовується для визначення типу провідності і дифузійної довжини.

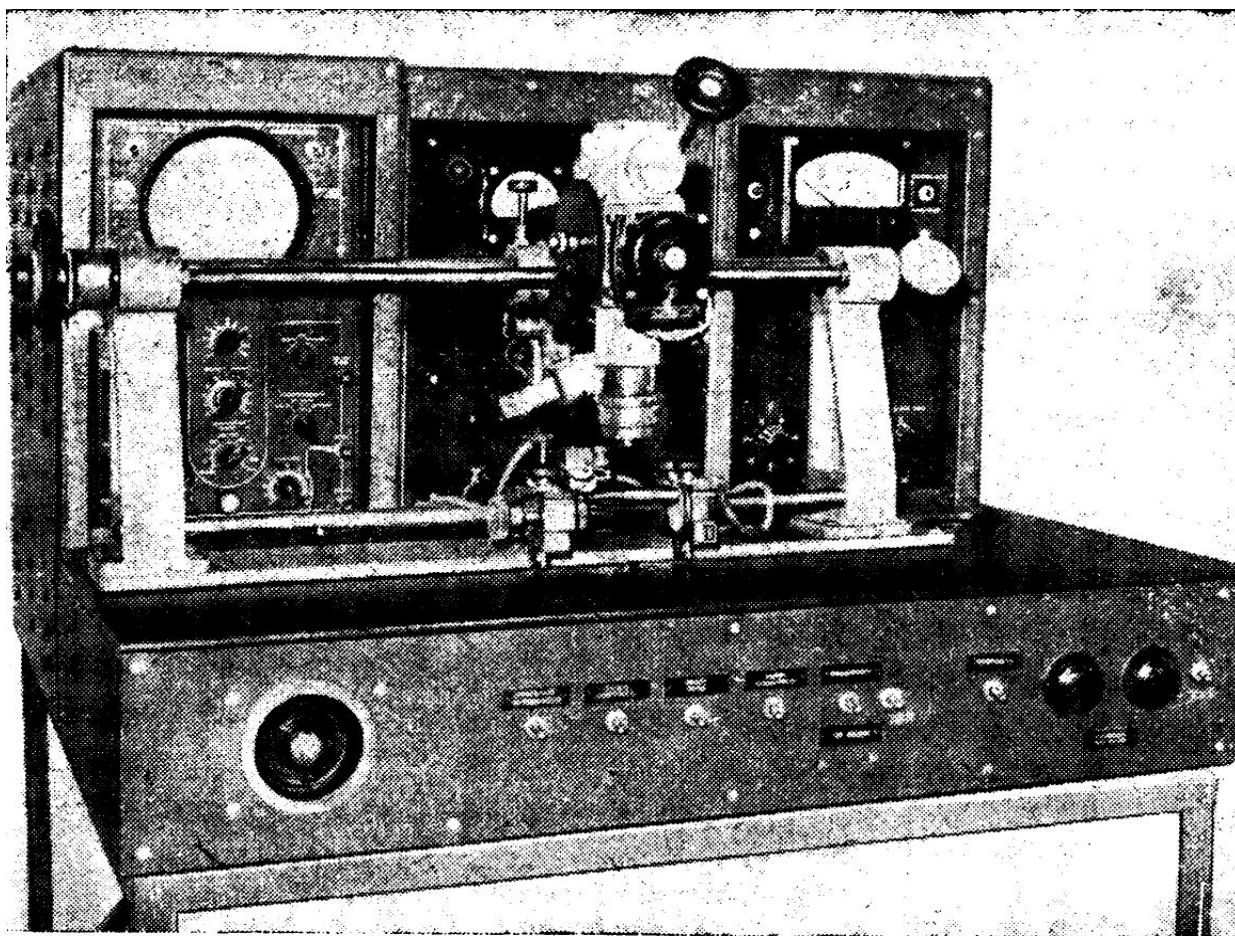


Рисунок 2.1 – Прилад вимірювання дифузійної довжини «Жало» [9]

У пристрої «Жало» освітлювальну систему переміщують вручну відповідно зразка. Вузька смужка світла утворюється за допомогою проектування на поверхню заготовки розжареної платинової нитки. Модулювання світла відбувається  $\sim 125$  гц барабаном з прорізами; з колекторного зонда посилюється сигнал підсилювачем, чутливістю  $\sim 100$  мкв.

Спеціальна промислова напівавтоматична установка, яка використовується для вимірювання дифузійної довжини зображена на рисунку 2.2. Основними складовими доної установки є освітлювальна система, система реєстру, затиск для злитків, маніпулятор колекторного контакту, блок формування та привід для автоматичного переміщення зразка відповідно світлової смужки.

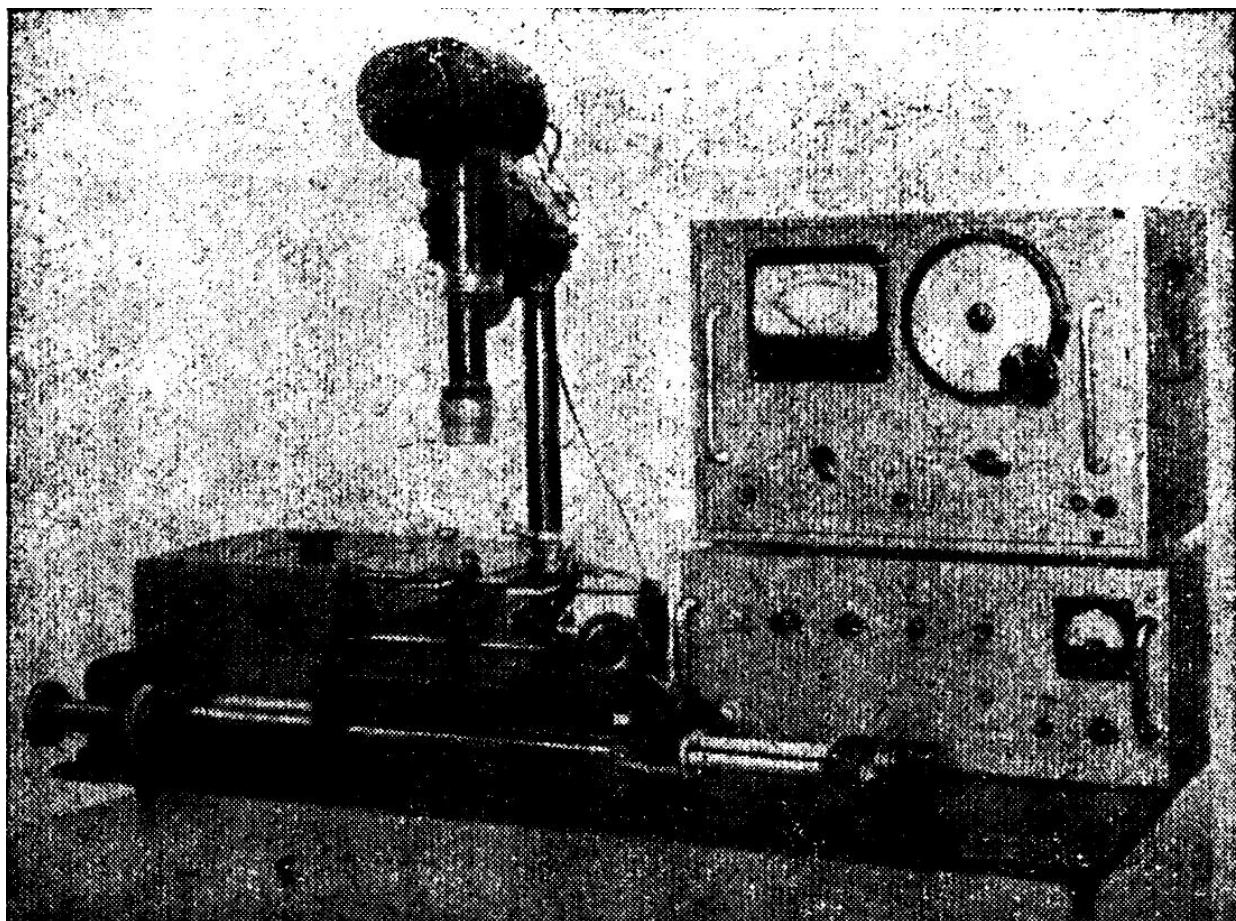


Рисунок 2.2 - Установка для вимірювання дифузійної довжини [4]

Вищезазначена система освітлення формується з джерела освітлення, а саме зі стрічкової лампи розжарення (типу СІ-100) у поєднанні з конденсором та з

оптичною щілиною, об'єктиву (типу «Юпітер-8»), саме вони проєктують щілину на поверхню зразка; модулятора світла - барабану з прорізами, що обертається за допомогою синхронного двигуна. За бажанням можна змінювати ширину світлової смужки від 20 до 500 мкм, що дозволяє у широкому діапазоні варіювати рівнем інжекції неосновних носіїв. Як правило, працюють зі смужкою світла  $\sim 50:100$  мкм, а істотна генерація носіїв заряду відбувається поблизу поверхні. Порядок реєстрації формується із стандартного підсилювача типу *B 6-2*, що має межу (граничну) чутливість  $\sim 1$  мкВ, на всю шкалу. Реєстрування сигналу відбувається на шкалі приладу *B 6-2* - селективного лампового вольтметра.

Затискач для злитків може переміщатися по горизонтальній площині у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Вимірювана поверхня злитку, на яку сфокусована освітлювальна щілина, завжди знаходиться у площині; в будь-яку точку поверхні зразка може опускатися колекторний зонд, його тиск регулюється.

При роботі із злитками певного типу, а саме: *n*-типу використовується заточений електролітом зонд з вольфраму, а при використанні злитків *p*-типу - колектор із дроту сплаву *Ag (2 % As)*.

Даний блок формування складається із випрямляча та фільтра, що його згладжує.

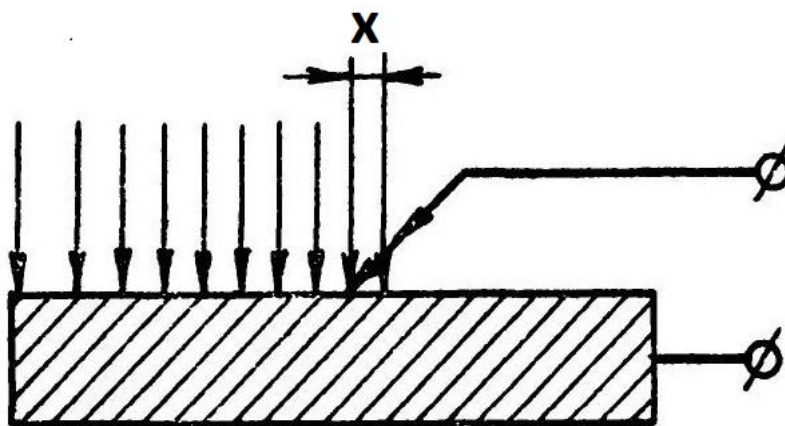


Рисунок 2.3 - Освітлення зразка який має напівнескінченну площиною [9]

Формування розподільного контакту асигнує для підвищення його фото чутливості, здійснюється імпульсами струму 50-100 ма. У даному пристрої застосовується автоматичне ступеневе переміщення злитка відповідно світлової смужки через кожні 100 мкм, за допомогою двигуна та механізму «мальтійський хрест». Діапазон швидкостей переміщення змінюється близько у 10 разів (максимальна швидкість біля 500 мкм/с). Оператор, при вимірюванні дифузійної довжини, вручну встановлює зонд у центрі світлової смужки в районі максимального сигналу, а потім, після включення механізму автоматичного переміщення, записує показання шкали вольтметра [3].

Перед вимірюванням заготовку відшліфовують порошком *M 28* або *M 14*, витравлюють у киплячому 30 відсотковому розчині  $H_2O_2$ , потім промивають та сушать за допомогою беззольного фільтру. Вищезазначені прилади мають широке застосування при вимірюванні дифузійної довжини у зливках германію, дозволяють проводити вимірювання дифузійної довжини в межах від 0,1 мм до 5,0 мм із похибкою, що є не більше 15 - 20 відсотків. Вимірювання на зразках кремнію відбуваються із обмеженням, на практиці як правило не застосовуються із багатьох причин: по перше – через високу швидкість поверхневої рекомбінації, сильної нелінійності колекторного контакту, а також високого рівня шумів та наявності поверхневих інверсійних шарів, що спотворюють результати вимірювань. Щільність надлишкових носіїв струму, які досягають голки, а, отже, і величину сигналу фото-*ЕРС* можна значно підвищити за допомогою освітлення зразка напівнескінченої площини, що зображено на рисунку 2.3.

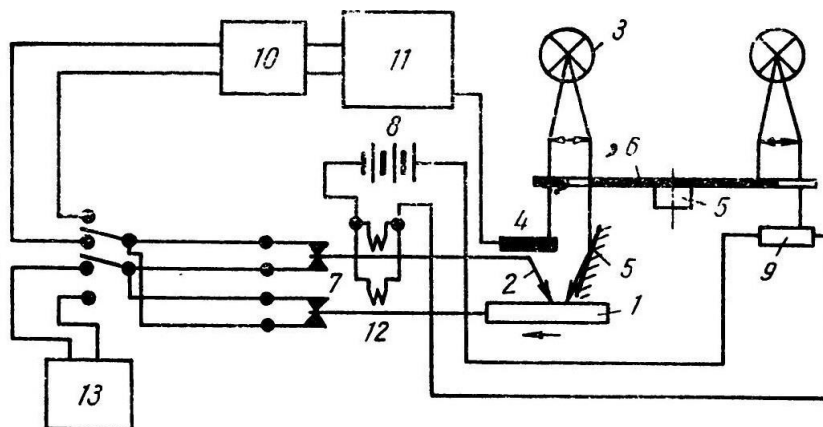


Рисунок 2.4 – Схема (блок) автоматизованого пристрою для вимірювання довжини дифузії надлишкових носіїв струму: 1 - досліджуваний зразок на пересувному пристрої; 2 - металевий зонд; 3 - освітлювач; 4 - пересувний непрозорий екран; 5 - двигун; 6 - модуляторний диск; 7 - роздільник сигналів фото-Е.Р.С. (Реле); 8 - джерело живлення; 9 - фотоопір; 10 - підсилювач; 11 - електронний потенціометр; 12 - омичний контакт зі зразком; 13 - підсилювач В6-2, який використовується при вимірах  $L$  по точкам [9]

На рисунку 2.4 показана схема автоматичного пристрою для вимірювань розподілу  $L$  по довжині напівпровідникових злитків. При використанні даної схеми величина сигналів фото-Е.Р.С. у багато разів перевершує сигнали при висвітленні світловою смужкою, які дають дозвіл автоматизувати процес вимірювання розподілу довжини дифузії  $L(x)$  по довжині при неоднорідних напівпровідникових злитків для визначення однорідності цих злитків по  $L$ .

Метод зонду рухомого світла має ряд модифікацій, які в основному використовуються в дослідницьких цілях. Втручання носіїв заряду може здійснюватися точковою світловою точкою, так що можна припустити, що надлишкова концентрація носія є функцією  $r$  (сферична симетрія). Для точкового джерела світла концентрація носіїв надлишкового струму низька; щоб збільшити це, можна використовувати підсвічування зразка у вигляді кільця. Враховуючи досить великий радіус кільця, проблему можна розглядати як одновимірну:

$$U_{\text{ф.р.с.}} = \text{const} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \quad (2.1)$$

Однак цей метод вимірювання не є широко поширеним, оскільки не має суттєвих переваг перед описаними вище методами, але є технічно складним.

Запропонований Адамом метод швидко рухомого світлового зонда є широко розповсюджений. Цей метод широко застосовується в навчальних закладах на практиці, студентських лабораторіях, оскільки це дозволяє чітко уявити та виміряти такі властивості неосновних носіїв заряду, як час життя  $\tau$ , коефіцієнт дифузії неосновних носіїв  $D$  та швидкість поверхневої рекомбінації  $s$ . Сутність даного методу полягає в наступному: на зразок, що досліджується падає пучок світла, який рухається зі швидкістю постійною уздовж світлочутливої поверхні кристалу, на який встановлений металевий зонд; а у освітленій області створюються надлишкові носії струму, що дифундують у освітлену область із швидкістю дифузії:

$$v_D = \frac{L}{\tau} \quad (2.2)$$

де  $L$  - середня дифузійна довжина;

$\tau$ - час життя.

$$\left\{ \begin{array}{l} p(x) = \text{const} \exp(-x/L_1); \\ \\ p(x) = \text{const} \exp(-x/L_2). \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Функція  $p(x)$  аналізується дослідженням - виміром фото-Е.Р.С., яка виникає під дією світла на металевому зонді.

За постійним  $L_1$ , і  $L_2$ , які знаходять на дослідно отриманій кривій, можуть бути обчислені час життя  $\tau$  та коефіцієнт дифузії  $D$ :

$$\tau = \frac{L_1 - L_2}{V_0} \qquad D = \frac{v}{\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2}} \qquad (2.4)$$

Як правило,  $L_1$  і  $L_2$  знаходять графічно по нахилу прямих  $\ln p = f(x)$ . Коли  $x$  змінюється в часі із рухом світлової плями, то за горизонтальну вісь приймають вісь часу та розрахунках виходять із графіка  $\ln p = f(t)$ .

$$\tau = \left( \frac{1}{\Delta \ln p_1} - \frac{1}{\Delta \ln p_2} \right) \Delta t \qquad (2.5)$$

$$D = \frac{v^2}{\Delta \ln p_2 - \Delta \ln p_1} \Delta t \qquad (2.6)$$

де  $\Delta \ln p_1$  та  $\Delta \ln p_2$  - різниці ординат двох прямих, відповідних рівним відріzkам по осі часу.

Проаналізуємо видозмінену різновидність вимірювання довжини дифузії методом Вальдеса [10]. Цей метод оснований на порівнянні фотовідповіді від двох світлових зондів, вони розташовані на різних відстанях від колекторного контакту. Довжина дифузії в цьому випадку вимірюється фотовідповіддю в двох точках, які знаходяться на відстанях  $x_1$  та  $x_2$  від світлової плями. Якщо швидкістю поверхневої рекомбінації можна знехтувати, та при цьому для всіх  $x_1 > x > x_2$ , то буде виконуватися співвідношення  $\frac{sx}{D} \ll 1$ , де  $D$  - коефіцієнт дифузії, дифузійна довжина визначається за формулою:

$$K_0\left(\frac{x_1}{L}\right) = \alpha K_0\left(\frac{x_2}{L}\right) \qquad (2.7)$$

де  $K_0$  - модифікована функція Бесселя нульового порядку;

$\alpha$  - співвідношення фотовідповідей в точках  $x_1$  і  $x_2$ .

Щоб визначити довжину дифузії в точці вимірювання, у точці зразка встановимо контактний колектор з вольфрамовим електрологічно заточеним зондом. Зонд жорстко встановлений з двома світлодіодами, які створюють освітлені смуги на поверхні напівпровідника. Для підвищення чутливості контакту колектора формується конденсаторний розряд. Світлодіоди будуть освітлюються паралельним променем світла. Інтенсивність світлової смуги, яка ближче до контакту колектора, змінюється затвором, який жорстко фіксується на дисплеї типу головки годинника і дозволяє точно регулювати освітлення.

Мостовий метод експлуатації носіїв заряду, що нагнітаються світлом. Наприклад, у формі паралелепіпеда з'єднані три контакти: два на кінцях та один посередині. Вірець включений у схему моста: центральний контакт з'єднаний діагоналлю моста, а дві половини візерунка служать плечима моста. Міст збалансований і потім освітлений половиною зразка вузькою смугою світла, при чому міст не збігається. Однак можна знайти положення світлового зонда, де міст врівноважений, якщо відома відстань від зонда до середнього контакту, то є можливість розрахувати час життя носіїв заряду. Цей метод будемо застосовувати для зразків з часом життя не менше 10 мксек.

Враховуючи, що теперішня техніка дозволяє отримувати контакти, а також світлові смужки шириною в кілька мікронів, цей метод є цікавим і може використовуватися для зразків з меншими часом життя так і для замірів температурної залежності часу життя неосновних носіїв заряду.

На сьогоднішній день описано кілька модифікацій методу рухомого світлового зонда.

Тут слід зазначити про запропонований Харріком безконтактний метод вимірювання часу життя по поглинанню інфрачервоного випромінювання на вільних носіях заряду. Відполірований та протравлений зразок (див.рис. 2.5) у вигляді прямокутника, висвітлюється з кінця білим світлом. При низькій поверхневій швидкості рекомбінації просторовий розподіл носіїв заряду можна розглядати як одновимірний. Прозорість напівпровідника вимірюється за допомогою інфрачервоного зонда як функції руху зонда по довжині зразка. За

методом Харріка вважається, що розподіл носіїв заряду по напрямку падаючого світла визначається в основному масовою рекомбінацією, а розподіл носіїв заряду у напрямку, перпендикулярному падаючому світлу, є поверхневою рекомбінацією.

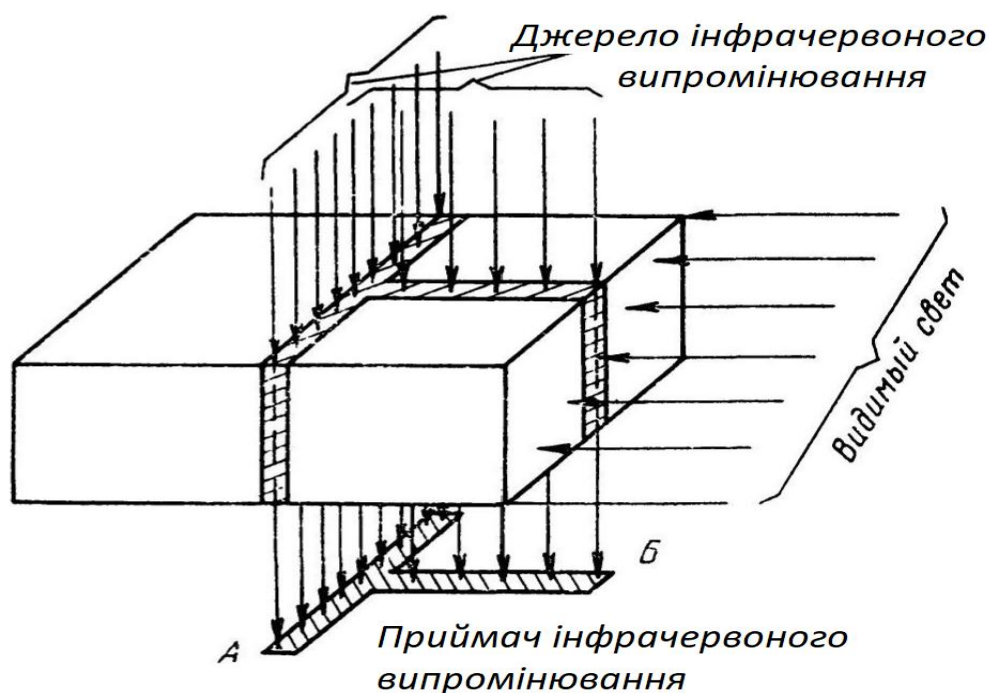


Рисунок 2.5 –вимірювання  
дифузійної довжини безконтактним методом [9]

Отже, роблячи вимірювання прозорісті в двох напрямках *A* і *B*, є можливість визначити довжину дифузії та швидкість поверхневої рекомбінації. Метод не вимагає контактів і додатків до зразку електричного поля. Зазначаємо, що, як і всі методи вимірювання довжини дифузії, вона підходить для визначення довших довжин дифузії і вимагає спеціальної підготовки зразків. Гаррік припускає, що використання вузького інфрачервоного променя є необхідною умовою для вимірювання *L* за його методом. Це не зовсім так, оскільки *L* також можна виміряти широким інфрачервоним променем, але з гострим краєм.

Можливості процесу значно покращуються при використанні лазерного променя 3,39 мкм або 10 мкм., використовується в якості зондуючого променя.

## 2.2. Формування та вибір джерела світла для формування світлової смужки

У ході дослідів вибір стояв між світлодіодами інфрачервоного діапазону, та іншими світлодіодами, провівши декілька експериментів та подолавши труднощі відносно визначення, довжини світлової смужки було встановлено, що для наших дослідів краще підходять світлодіоди видимого діапазону. Для проведення дослідів ми обрали смужку світла, що створюється із 6 лінійно розташованих світлодіодів червоного діапазону, тому що для фото інжекції не рівноважних носіїв заряду у пластинах кремнію, необхідно використовувати саме червоне джерело випромінювання.

Використання світлодіодного джерела червоного діапазону, у якому кремній має достатньо високу фоточутливість, на меті є розробити експериментальний стенд здатним для визначення дифузійної довжини, так й для одночасного визначення релаксаційного часу життя.

Також важливим було те, що для вимірювань необхідно бачити смужку, її розміри, а саме довжину, та ширину смужки. У разі визначення дифузійної довжини через світлодіод через нього пропускається постійний та імпульсний прямий струм. При визначенні часу життя необхідний імпульсний прямий струм з меншим часом зміни фронтів світлових імпульсів.

Спектральний максимум світлодіодів повинен відповідати пропускну здатності кремнію, тобто  $\lambda_{\max} \leq 1,234$  мкм., придатними за параметрами для виконання поставлених завдань виявилися галій – алюміній – миш'як діоди АЛ307А.

Світлодіод з розсіяним випромінюванням, виготовляються з епітаксіальних структур на основі наступних матеріалів: АЛ 307А – твердий розчин галій – алюміній – миш'як. Випускається в пластмасових корпусах масою не більше 0,35 гр [16].

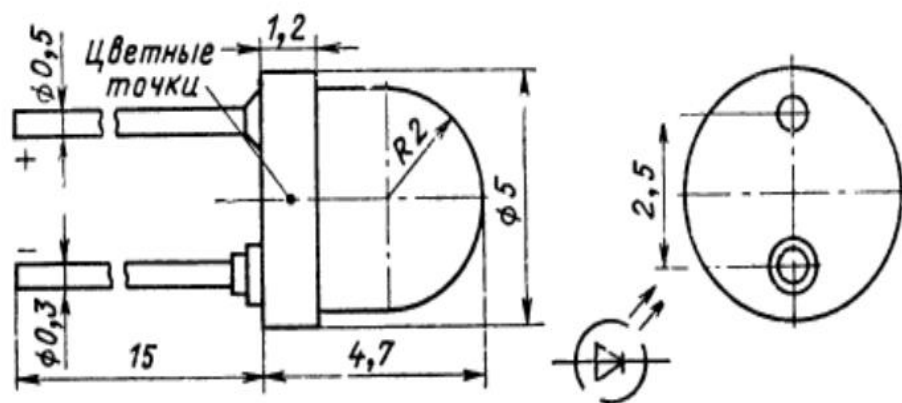


Рис. 2.6 – Корпус та схематичне позначення світлодіоду типу АЛ307А [16]

Маркуються кольоровими точками на корпусі АЛ307А – одна чорна точка.

Електричні та світлові параметри при  $T_{окр} - 25^{\circ}C$

Сила світла не менше (вимірювалась при  $I_{пр} = 10 \text{ мА}$ ) .... 0,15 мкд.

Постійна пряма напруга не більше .... 2 В.

Колір випромінювання – червоний.

Максимум спектрального розподілу випромінювання на довжині хвилі  
0,666 мкм.

Граничні експлуатаційні дані:

Постійний прямий струм .....20 мА.

Зворотня постійна напруга .... 2В.

Діапазон робочої температури навколишнього середовища .....  $-60 \div +70^{\circ}C$ .

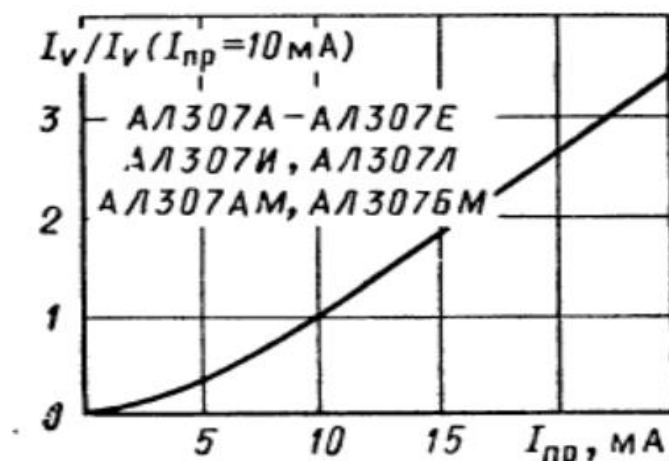


Рис. 2.7 – Залежність сили світла від прямого струму[16]

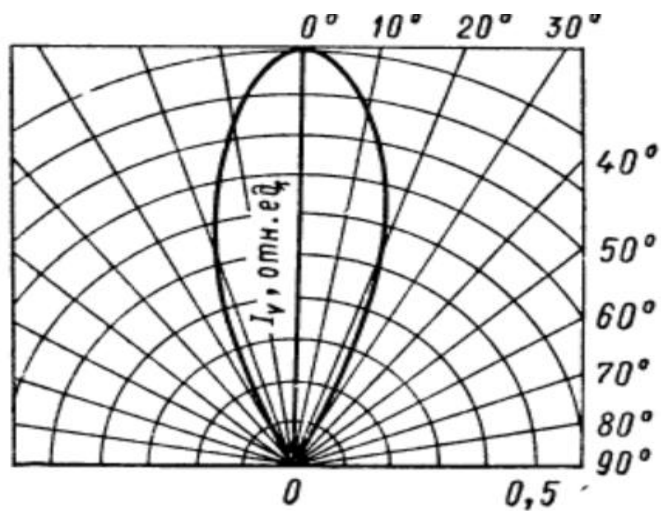


Рис. 2.8 – Діаграма направленості випромінювання [16]

Функціональна структура експериментального стенду

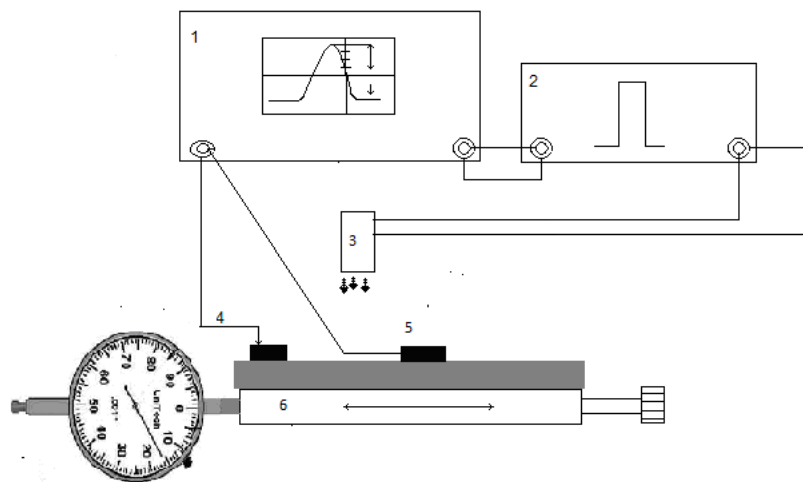


Рисунок 2.9 - Схема реалізації на практиці фотоінжекційного методу вимірювання дифузійної довжини: 1-осцилограф, 2-імпульсний генератор, 3-смужка із 6 червоних світлодіодів, 4-пасивний бар'єрний контакт Ме-н/п, 5-активний бар'єрний контакт Ме-н/п, 6-столик з мікрометром [2]

### Фотоінжекція неосновних носіїв заряду

Інжекція - процес введення додаткової кількості рухомих носіїв у напівпровідник (походить від англійського слова inject — впорскувати, вводити) [2].

У контактній зоні двох провідників з різними рівнями Фермі створюється потенційний бар'єр, врівноважуючи рівні Фермі. До них відносяться контакти, виготовлені з металевих напівпровідників, напівпровідників *n* та *p* типу тощо. Електричне поле потенційного бар'єру відокремлено незбалансованими парами електрон-дірок, які виникають:

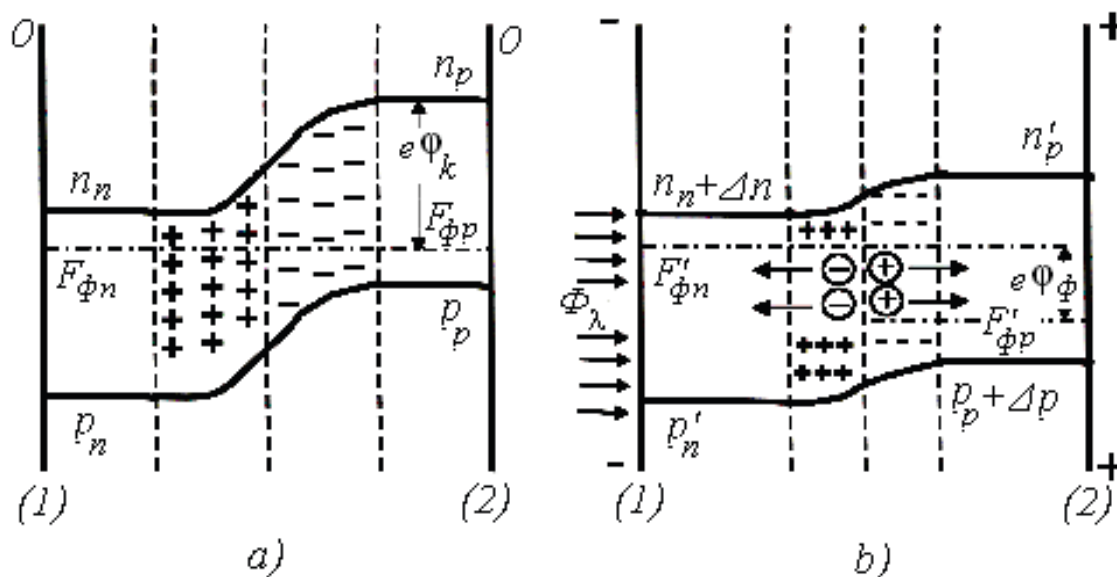


Рисунок 2.10 - Енергетичні діаграми *p-n* переходу: *a*) у стані стаціонарної рівноваги, *б*) при власному поглинанні світла. (1),(2) - зовнішні межі переходу,  $F_{\phi}$ - рівні Фермі,  $F'_{\phi}$ - квазірівні Фермі,  $\phi_{\phi}$ - фотоелектрична різниця потенціалів,  $\phi_k$ - контактна різниця потенціалів (темнова різниця потенціалів) [2]

Із власним поглинанням світла безпосередньо у зоні контакту або у зоні дифузії. Розглянемо фізичну модель процесів на прикладі потенційного бар'єру *p-n* - переходу з власним поглинанням світла. Енергетична діаграма *p-n* - переходу в стаціонарному стані показана на рисунку 2.10. (а). Одночасна дифузія електронів і дірок між *p* - і *n* - частинами переходу припиняється контактною різницею

потенціалів  $\phi_k$ , що є результатом переходу певної кількості електронів у р - і дірок у п - частині напівпровідника переходу. Різниця контактів  $\phi_k$  розраховується так, що рівні Фермі дорівнюють  $F_{\phi n} = F_{\phi p}$ , що є основною умовою рівноваги в стаціонарному стані [16].

При цьому -  $\phi_k$  - рівноважна різниця потенціалів, яка відсутня у зовнішніх контактів і не може виконувати роботу у зовнішньому колі; - Відсутність певної кількості основних носіїв р - і п - області контакту порушує загальну нейтралізацію зарядів донорів і акцепторів, і створює електричне поле в області заряду, спрямованого від п – до р.

Поверхня (1) електронної частини переходу, як зображено на рисунку 2.10 (б), опромінюється світловим потоком з енергією фотона. Світло поглинається оптично та дифузійно тонким п - шаром, товщина якого дорівнює  $\ll L_d$ . Нерівноважні пари електрон-дірок, утворені власним поглинанням світла, відокремлюються електричним полем у зоні заряду космічного переносу; освітлена область (1) заряджена негативно. Дірки дрейфують у напрямку поля, нейтралізуючи деякі акцептори та виробляючи позитивний нерівноважний заряд у р-області та на поверхні (2), що зображено на рисунку 2.10 (б).

Потенційна енергія  $e\phi_k$ , накопичена в просторовому заряді переходу, має можливість частково перетворюється на кінетичну енергію нерівноважних електронів та дірок. Потенційний бар'єр переходу зменшується на  $e\phi_f$ , а між контактами (1) - (2) виникає різниця між потенціалами  $\phi_f$ .

Як наслідок, отримаємо різницю фотоелектричних потенціалів  $\phi_f$  термодинамічно незбалансована і може працювати у зовнішньому колі. Основою енергії для виконання роботи є енергія фотонів, поглинених напівпровідником.

Зі збільшенням інтенсивності світлового потоку та дисбалансу концентрація  $\phi_f$  збільшується, але в той же час поле просторового заряду зменшується за рахунок появи мобільних носіїв заряду. При досить високому рівні фотоінжекції  $\phi_f$  досягає рівня  $\phi_k$  і розділення пар електрон-дірок припиняється. Проведемо аналіз вищезгаданого процесу.

Формула для розрахунку довільного рівня інжекції, за певних умов:

$$p = p_0 + \Delta n; n = n_0 + \Delta n; \nabla p_0 \neq 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla n_0 \neq 0; \Delta n = \Delta p; \nabla \Delta n = \nabla \Delta p = 0$$

Позитивний напрямок вісі  $x$  від освітленої поверхні (1) на рисунку 2.8 (б), на глибину напівпровідника до поверхні (2).

Визначимо співвідношення між градієнтами рівноважних концентрацій, виходячи із закону діючих мас  $n_0 p_0 = n_i^2$ :

$$n_0 \frac{dp_0}{dx} + p_0 \frac{dn_0}{dx} = 0 \rightarrow \frac{dp_0}{dx} = -\frac{p_0}{n_0} \frac{dn_0}{dx} \quad (2.9)$$

Врахуємо співвідношення Ейнштейна використовуючи формули (2.8) та (2.9), позначимо  $b = \mu_n / \mu_p$ , та визначимо різницю потенціалів  $\varphi_k$  на переході без світла  $\Phi_\lambda = 0, \Delta n = 0$ :

$$\varphi_k = \int \mathcal{E}_{cm} dx = \frac{k_B T}{e} \int_{n_p}^{n_n} \frac{dn_0}{n_0} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (2.10)$$

де  $n_p$   $n_n$  – концентрації електронів у  $n$ -та  $p$ -частинах переходу, відповідно. Контактна різниця потенціалів  $\varphi_k$  (формула 2.10) має максимальне значення  $\varphi_{k \max}$  для певного виду напівпровідника за умов, що рівень Фермі  $F_{\phi n}$  співпадає з дном зони провідності, а рівень  $F_{\phi p}$  – зі стелею валентної зони:

$$e\varphi_{k \max} \leq F_{\phi n} - F_{\phi p} \leq E_g \quad (2.11)$$

Домогтися цього поєднання рівнів Фермі з межами зон практично неможливо, тому що завжди існує певна кількість неосновних носіїв заряду  $n_p$  і  $p_n$ . Для прикладу, у кремнії  $E_g=1,07$  еВ, а  $\varphi_{\kappa}\approx 0,5\dots 0,7$  В замість 1,07 В, у арсеніді галію  $E_g=1,35$  еВ, а  $\varphi_{\kappa}\approx 1,2$  В.

Визначимо  $\varphi_{\phi}$ , врахувавши  $\Delta n \neq 0$ :

$$\varphi_{\phi} = \frac{k_B T}{e} \int_{n_p}^{n_n} \frac{\Delta n (b+1)}{bn_0^2 + \Delta n (b+1)n_0 + n_i^2} dn_0 \quad (2.12)$$

У широкозонних напівпровідників ( $\Delta E_0 \geq 1$  еВ)  $n_i \ll n_0, p_0$ , (саме їх застосовують для фотоперетворювачів), тому ігноруємо доданок  $n_i^2$  у знаменнику (2.12):

$$\varphi_{\phi} = \frac{k_B T}{e} \int_{n_p}^{n_n} \frac{\Delta n (b+1)}{bn_0^2 + \Delta n (b+1)n_0} dn_0 \quad (2.13)$$

Введемо позначення:  $A = b, B = \Delta n (b+1), x = n_0$ . Інтегральна частина (2.13) тепер має вигляд табличного інтеграла:

$$\varphi_{\phi} = \frac{k_B T}{e} B \int_{n_p}^{n_n} \frac{dx}{Ax^2 + Bx} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} - \frac{k_B T}{e} \ln \frac{b_n + (b+1)\Delta n}{bn_p + (b+1)\Delta n} \quad (2.14)$$

Перший доданок у формулі 2.14 – темнова різниця потенціалів  $\varphi_{\kappa}$  формули 2.10, другий доданок залежить від формули інжекції  $\varphi = f(\Delta n)$ . При умові, що  $\Delta n = 0$  дорівнює  $\varphi = \varphi_{\kappa}$ , а  $\varphi_{\phi} = 0$ . Високий рівень фотогенерації  $\Delta n_{\infty} \gg n_n, n_p$ , зменшує другий доданок  $\varphi \rightarrow 0$ , а  $\varphi_{\phi}$  насичується на рівні  $\varphi_{\kappa}$ . Отже, фотоелектрична різниця потенціалів  $\varphi_{\phi} = \varphi_{\kappa} - \varphi$  при зміні  $\Delta n$  у межах  $0 \leq \Delta n < \Delta n_{\infty}$  має значення в діапазоні:

$$0 \leq \varphi_{\phi} \leq \varphi_{\kappa} \quad (2.15)$$

Якщо врахувати  $\varphi_{\text{кmax}}$  (2.11), то теоретичний максимум  $\varphi_{\text{кmax}} \text{ max} \leq E_g / e$  – ширина забороненої зони, визначена у вольтах.

Бар'єрний фотоелектричний ефект використовується у практичних фотодіодах та сонячних елементах, які є поновлюваними джерелами енергії. Енергоефективність сучасних сонячних камер становить 14-16%.

### 2.3. Очистка поверхні пластин кремнію для кращої адгезії алюмінієвої контактної плівки та зменшення швидкості поверхневої рекомбінації

Найпоширенішими травниками для кремнію є суміші на основі азотної та плавикової кислоти. Для досягнення цих результатів потрібно ретельне очищення поверхні, і слід дотримуватися процесу травлення поверхні, щоб вона не контактувала з повітрям. Деталі наведені в таблиці 2.1 [12].

Таблиця 2.1 – Існуючі травники для травлення Si

№	Назва травника	Склад травника	Умова травлення	Основні призначення
1	Травник Уайта	3 ч. HNO <sub>3</sub> 1 ч. HF	15 сек	Поліруючий
2	Травник Деша	3 ч. HNO <sub>3</sub> 1 ч. HF 8-12 ч. HAc	Від 1 год до 16 год	Травлення всіх площин. Глибокі ямки, які проходять уздовж дислокаційних ліній у середині кристала. При меншій кількості HAc швидкість травлення збільшується, що набуває великого значення.
3	CP-4A	5ч. HNO <sub>3</sub> 3ч. HF 3ч. HAc	2-3 хв.	Повільне хімічне полірування. Вплив двійників, <i>p-n</i> переходів.
4	SD-1	0.1 мл Br <sub>2</sub> 10 мл H <sub>2</sub> O 1г Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +3ч. CP-4A	2-4хв	Виявлення краєвих і змішаних дислокацій на всій площині. Гарний травник для швидкої оцінки щільності дислокацій по ямкам травлення. Але при травленні може осідати мідь.

Продовження таблиці 2.1

5		100 ч. HF 0.1-0.5 ч. HNO <sub>3</sub>		Травлення проводиться шляхом нанесення капель розчину на пошліфовану поверхню при сильному освітлені. Матеріал <i>p</i> -типу темніє сильніше ніж <i>n</i> -типу
6	Лужний	50 мл розбавленого розчинника Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 1-2 каплі HF		Застосовується при освітлені білим світлом.
7		1 ÷ 30 %-вий Розчин NaOH або KOH	1-5 хв. 50-100°C	Швидко виявляє структурні деталі. Але залишає хімічні сліди потребуючі хімічного промивання HCl.

Вибрати відповідний травник для кремнію може бути досить складно. Однак, враховуючи вимоги до цього зразка, вибираємо даний травник.

При виборі необхідно враховувати:

- 1) Для кремнієвих пластин ефект орієнтації слабкіший, ніж для германію та інших матеріалів.
- 2) Для швидкості результату застосовуємо травник Деша.
- 3) Необхідно уникати травників з металом.
- 4) Необхідність гладкості поверхні, для випробувань на темному полі або для незначних помилок.

При обробці напівпровідникових пластин полірування забезпечує високу якість робочої поверхні, допускаються мінімальні порушення верхнього шару та найменші похибки форми. Полірування відбувається на напівавтоматичному Ю1МЗ.105.004, що зображено на рисунку 2.9.

Пластини, що зображені на рисунку 2.11, приклеюють на круглі алюмінієві блоки зі спеціальною мастикою і шліфують з одного боку в два етапи: фініш та суперфініш. Полірувальник - це сталевий або чавунний диск, покритий спеціальним матеріалом. На полірувальнику кілька блоків обробляються пластинами. При обробці листів великого діаметру, які вимагають особливої точності форми, іноді

виконується двостороння обробка та надтонка обробка, дотримуючись схеми, подібної схемі двостороннього шліфування. Тільки диски покриті полірувальним матеріалом. У цьому випадку операція з проклейки виключається [13].

Розглянемо методи полірування, вони як і шліфування, поділяють - на алмазну (механічну) та хіміко-механічну, та за якістю оброблення поверхні - на фінішну та супер фінішну.

Механічне (алмазне шліфування) проводиться алмазними пастами і суспензіями розміром зерен від 3 до 0,5 мікрметрів на полірувальник тканих і нетканих матеріалів (атлас, тканина, замша, штучна шкіра тощо), після чого поверхня пластин має мікропористість висотою 0,05 до 0,1 мкм, а порушений шар не більше 3 мкм. При механічному поліруванні обробку проводять мікрорізнанням, пластичною деформацією та згладжуванням поверхні. Алмазні зерна, прикріплені до полірувальника, відрізають мікрополоски, залишаючи мікроподряпини, розмір яких визначається зернистістю алмазного порошку. Таким чином, після алмазного полірування на поверхні плит залишається «алмазний фон», тобто мікрорешітка, її можна спостерігати при освітленні пучком світла, який падає під кутом до даної поверхні.

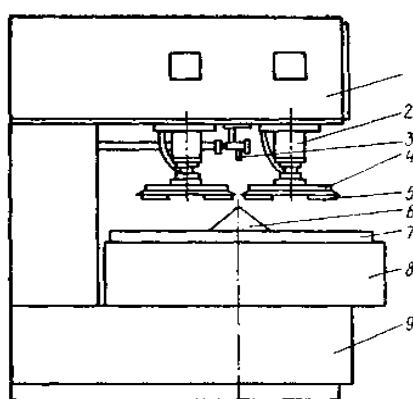


Рисунок 2.11 – Напівавтомат для хіміко-механічної поліровки [13]

У хіміко-механічному поліруванні використовуються спеціальні полірувальні композиції з субмікронних порошоків оксиду кремнію, цирконію або алюмінію, осаджених у розчині на основі КОН, NaOH. Використання суспензій на основі

хіміко-механічного полірування передбачає хімічні реакції між компонентами рідкого середовища та полірувальним матеріалом.

Вступаючи в реакцію з кремнієм, гідроксильна група лужного компонента утворює на поверхні лужні сполуки даних матеріалів, що механічно руйнуються при контакті з полірувальними та абразивними частинками (суспензія твердої фази). Через малі розміри абразивних зерен ( $\sim 0,1$  мкм) майже немає прямого контакту між ними та оброблюваним матеріалом, залишаючи поверхню пластин без подряпин з мінімальним пошкодженням (менше 1 мкм).

Для поліпшення якості оброблюваної поверхні пластин і підвищення швидкості видалення матеріалу використовується композиція на основі гідроалюмосилікального гелю, силікагелю. Хімічна взаємодія твердих фаз з оброблюваним матеріалом підвищує ефективність їх використання порівняно з суспензіями дрібних оксидів.

При хіміко-механічному поліруванні полірування складається з синтетичних тканин і полотна (електростатична замша, синтетична шкіра - політан тощо), що наклеєні на диск для полірування. За допомогою полірувальника полірувальний склад наноситься на поверхню оброблюваного матеріалу, видаляється матеріал та видаляються продукти обробки. Матеріал полірувальника повинен бути стійким до впливу шліфувальних суспензій, до дії зусиль різання під час полірування та по всій площі полірувальних рівномірних властивостей та однакової товщини.

Наведемо приклади, що використовуються при практичній поліровці.

Полірувальний склад для чистової обробки виготовляється на основі кремнію або цирконію, чи алюмосилікату. Порошок (50-120 г) перемішували в 1 л деіонізованої води, до якої додавали луг, щоб розчин мав рН від 11,0 до 13,0. Якщо рН нижче цих значень, він збільшується шляхом додавання лугу по краплях, після чого суміші дають відстоятися протягом 8-48 годин, знову перемішують і рН контролюють. Склад фільтрують через два шари нейлону і готовий до вживання. Його концентрація становить  $T: W = 1:60 \div 1:20$ , термін зберігання - 72 години від моменту приготування.

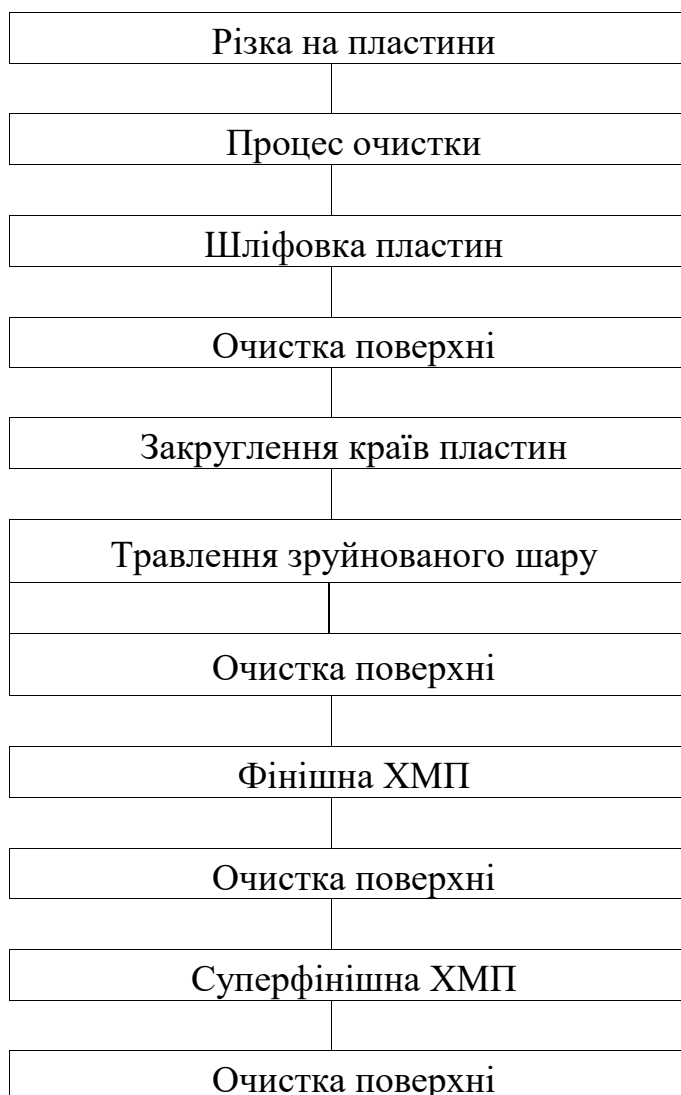
Пластини склеюються спеціальними речовинами на круглих блоках, які розм'якшуються або плавляться при нагріванні. Речовини наносять тонким шаром через подвійну капронову тканину до нагрітого до необхідної температури блоку, при цьому пластини знаходяться як мінімум на 2-3 мм від його окружності. Пластинка встановлюється на пресі і створює тиск  $6 \cdot 10^{-2}$  МПа. При невеликому серійному виробництві тиск на етикетці створюється за допомогою навантажень, що чиняться на блок еластичним ущільнювачем. Блок витримують під тиском до охолодження, що можна прискорити природним шляхом або охолоджуючи стіл проточною водою.

Навіть після промивання та знежирення зразків органічними розчинниками на поверхні напівпровідника залишається тонкий шар різних домішок. Більше того, ця поверхня завжди не ідеальна через пошкодження поверхневого шару під час різання та шліфування. Тому для вимірювання справжніх характеристик напівпровідника необхідно видалити домішки та дефекти поверхневого шару травленням.

Хімічна обробка поверхні напівпровідникових пластин передує процесам виготовлення напівпровідникових приладів та ІМС і поділяється на очищення та травлення. Під час очищення забруднювачі видаляються, травлення також утворює рельєф на робочій поверхні пластини, видаляються технологічні шари та виявляє структурні дефекти напівпровідникового матеріалу. У сучасній технології застосовуються фізичні процеси для очищення та травлення.

Технологічно чистою вважається поверхня, на якій концентрація домішок не впливає на підтримку заданих параметрів компонентів та ІМС та їх стійкість [13]. Для того щоб вибрати правильний спосіб очищення, необхідно знати, який тип забруднення присутній на поверхні панелей, як їх видалити, який вплив вони можуть мати на характеристики компонентів та ІМС, а також на якість подальших операцій та методів. Процедура хімічного очищення наведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Цикли обробки хімічним методом при механічній обробці пластин напівпровідника



Найважливішими є процеси очищення після найтоншого хімічного механічного полірування проти термічних процесів та осадження плівки. При високій температурі зростає дифузія небажаних забруднень та ймовірність їх утворення хімічних сполук і твердих розчинів з кремнієм. Залежно від фізичного стану використовуваних реагентів, процеси очищення та травлення підрозділяються на рідкі та сухі (газові) залежно від процесу - фізично та хімічно.

Фізичні методи очищення включають ультразвукове очищення, промивання домішок рідким потоком, продування газом, обстріли іонними та електронними променями, обробка у вакуумному та інертному середовищі при високій

температурі. Для хімічного розчинення забруднень, отруєння домішок разом з тонким поверхневим шаром напівпровідникового матеріалу.

Техніка очищення залежить від типу забруднення поверхні.

Фізичне забруднення, спричинене фізичною адсорбцією, поділяється на неорганічне та органічне. Фізична адсорбція домішок на поверхні напівпровідникового матеріалу є результатом міжмолекулярної взаємодії, викликані силами Ван-дер-Ваальса, а також електростатичної поляризації (кулонівська взаємодія заряджених частинок) та і є оборотним процесом. Адсорбовані частинки можуть подолати сили, які зв'язують їх з поверхнею та перейти у початкову фазу. Неорганічні забруднення видаляються гідромеханічним очищенням або продувають через потік очищеного азоту.

Органічні домішки під час термічної обробки розкладаються, утворюючи атоми вуглецю, які служать центрами утворення дефектів. Органічне забруднення можна розділити на полярне та неполярне.

У кремнії зменшити швидкість поверхневої рекомбінації одним тільки травленням до низьких рівнів неможливо. Значення  $S$ , отриманого після травлення, становить близько декількох тисяч см / с. Що свідчить про досить низький рівень поверхневого бар'єру. Зменшити  $S$  до декількох сотень см / с можна, обробивши чисту поверхню кремнію хімічним реагентом. Суть процесу в обробці поверхневих розчинів солей з високим значенням стандартного окислювально-відновного потенціалу  $E$ , тобто хроматів та гіпохлоридів. Ці солі відновлюються електронами поблизу напівпровідникової поверхні, так що поверхня стає більш позитивною щодо об'єму зразка і залишається стабільною протягом тривалого часу.

Кремній який був протравлений у суміші  $\text{HNO}_3 + \text{HF}(10:1)$  кип'ятити у деіонізованій воді 30 хв., то зсуває провідність в сторону більш вираженого  $n$ -типу. Що призведе до високої  $S$  в кисні і низьким в парах води.

### Поліруюче травлення пластини кремнію

Нами використовувалося полірувальне травлення для підготовки наших зразків використовували даний метод для видалення поверхневого шару дефектів, що утворюються при різанні монокристалів алмазними дисками.

Таке травлення проходить за допомогою *SP-4*, тобто суміш азотної та плавикової кислоти:



Згодом, після полірування ми повинні підготувати маски для досліджувальних пластин. Маска виготовили з алюмінієвої фольги. Це робилося для фокусування контактів лише на потрібних рівнях кристала. Ми наносимо самі контакти на термовакуумне покриття з алюмінію через нашу маску. Хімічним окисником у нашій реакції виступав  $\text{-HNO}_3$ , а  $\text{HF}$ - розчинник окисла, він утворюється у результаті окиснення першим розчинником  $\text{SiO}_2$ .

### 2.4. Виготовлення бар'єрного контакту (Бар'єр Шотки)

Припустимо, існує контакт між металом і не виродженим електронним напівпровідником, якщо рівень Фермі виділеного металу  $F_m$  нижче рівня Фермі напівпровідника  $F_n$ , тобто  $\Phi_m > \Phi_n$ , то потік електронів напівпровідника в перший момент зіткнення перевищує потік електронів металу. В результаті метал у контактній області отримує негативний заряд, а напівпровідник - позитивний, а між контактними зразками виникає електричне поле, що перешкоджає переносу електронів з напівпровідника в метал. Спрямований потік електронів відбувається до тих пір, аж поки рівні Фермі в системі не вирівнюються, зображено на рисунку 2.12 (а) і не встановиться рівновага, що характеризується рівністю струмів випромінювання термоелектронів [4].

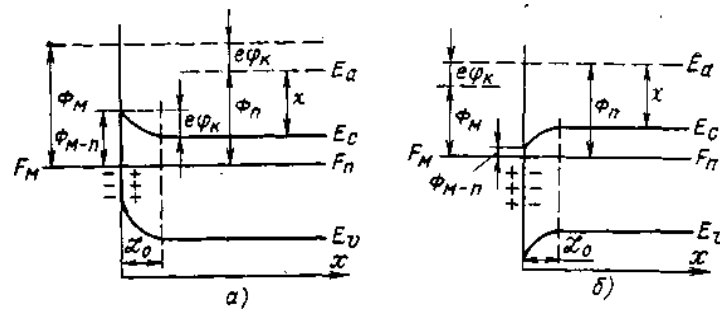


Рисунок 2.12 - Контакт метал - електронний напівпровідник у випадку

$\Phi_M > \Phi_{\Pi}$  (а) та  $\Phi_M < \Phi_{\Pi}$  (б) [4]

$$j_{M0} = j_{\Pi 0} \quad (2.17)$$

Звідки,

$$eU_K = \Phi_M - \Phi_{\Pi} \quad (2.18)$$

Різниця контактного потенціалу майже повністю падає на контактну поверхню напівпровідника. Напряга електричного поля на поверхневому шарі напівпровідника, викликана різницею потенціалу контакту, не перевищує  $10^6$  в/см. . Оскільки напруженість поля, викликана кристалічними іонами решітки, становить близько  $10^8$  в/см, невелике додавання різниці контактних потенціалів не може змінити зазор смуги напівпровідника, але воно спотворює його енергетичну зону щодо рівня Фермі, і це спричиняє зміна концентрації електронів у його приповерхневому шарі (вигін на величину  $eU_K$ ).

Однак якщо робота електронів напівпровідника нижче, ніж розряд металу ( $\Phi_M > \Phi_{\Pi}$ ), напівпровідник стає позитивно зарядженим, а енергетичні зони в контактній області зігнуті вгору, а при  $\Phi_M < \Phi_{\Pi}$  вниз.

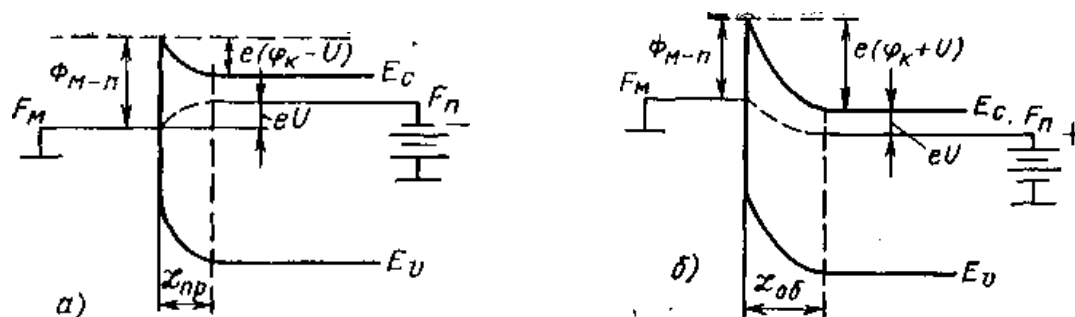


Рисунок 2.13 – Контакти метал-дірковий напівпровідник в разі

$\Phi_M > \Phi_{\Pi}$  (а) і  $\Phi_M < \Phi_{\Pi}$  (б) [4]

Тобто, коли вихід електронів металу більший, ніж у напівпровідника, площа контакту збагачується отворами і при  $\Phi_M > \Phi_{\Pi}$  збагаченні електронами. Таке збагачення електронами або дірками супроводжується зниженням провідності. Шар низької провідності називається запірним.

У діркового напівпровідника концентрація дірок у контакті більша за об'єм зразка, як зображено на рисунку 2.14 (а), тобто утворюється шар із підвищеною питомою провідністю. Контактний шар напівпровідника з високою питомою провідністю (збагачений основними носіями заряду) називається антиблокуючим:

$$eU_K = (\Phi_M - \chi_0) - (\Phi_{\Pi} - \chi_0) = \Phi_{M-\Pi} - \Phi_{\Pi-M} \quad (2.19)$$

При формулі  $\Phi_{M-\Pi} = (\Phi_M - \chi_0)$  необхідно виконати роботу, щоб електрон з рівня металу Фермі контактував із дном смуги напівпровідникової провідності. Енергія, необхідна для передачі електрона, який знаходиться в нижній частині смуги провідності в об'ємі напівпровідника, безпосередньо в метал після контакту ( $U_K = 0$ ).

Припустимо, електричне поле проникає в електронний напівпровідник на глибину  $x$ . У зоні контакту енергія електронів знаходиться в нижній частині зони провідності та дорівнює  $E_c + eU(x)$ :

$$\rho = en_0 \left[ 1 - e^{-\frac{eU(x)}{k_0T}} \right] \quad (2.20)$$

Коли, в приконтактному шарі різниця потенціалів припадає у приконтактну область напівпровідника, можна вважати, що  $eU(x) \gg k_0T$ . Даний вираз прийме вид:

$$\rho = en_0 \quad (2.21)$$

Для знаходження  $\xi$  використаємо формулу:

$$U(0) = U_k = \frac{1}{e}(\Phi_M - \Phi_{II}) \quad (2.22)$$

Цей випадок дозволяє визначити глибину проникнення контактної області в напівпровідник:

$$\xi = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_k}{en_0}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_M - \Phi_{II})}{e^2 n_0}} \quad (2.23)$$

З даних формули ми бачимо, що чим менший ступінь легування напівпровідника і чим більше різниця робіт виходу електронів з металу і напівпровідника, в цьому випадку і тим більшою є глибина проникнення напівпровідник електричного поля, який викликаний контактною різницею потенціалів. При різниці робіт виходу порядку 1 *ев*.

В цьому випадку глибина проникнення поля в 10 разів перевищує довжину екранування у випадку контакту метал-вакуум-напівпровідник:

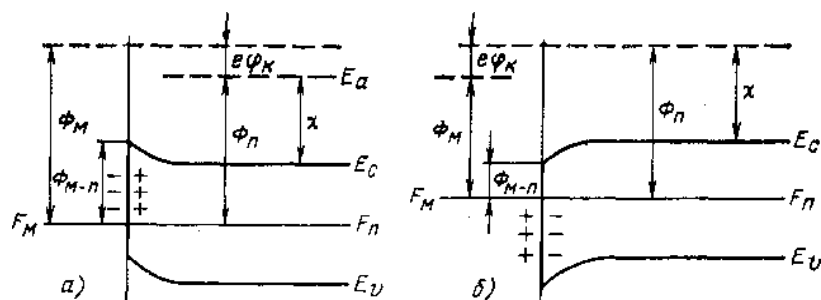


Рисунок 2.14 - Контакт метал-власний напівпровідник в разі

$$\Phi_M > \Phi_{II} \text{ (a) та } \Phi_M < \Phi_{II} \text{ (б) [4]}$$

В разі, коли метал починає контактувати з власним напівпровідником, викривлення зон супроводжується збільшенням провідності у поверхневому шарі. У цьому випадку відбувається викривлення зон для кожного випадку.

## **Висновки до розділу 2**

У розділі 2 розглянуто стенди для вимірювання дифузійної довжини та часу життя фотоінжекційними методами. Для проведення дослідження розроблено макет нашого стенду. Даний стенд включає необхідні елементи, які потрібні для здійснення вимірювання, методом рухомої смужки. Також було підібрано червоне джерело світла відповідно до поставлених завдань. Вказано процеси які відбуваються у зразку під час дії на нього фото-Е.Р.С., розглянутий метод виготовлення бар'єрних контактів.

## **РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИФУЗІЙНОЇ ДОВЖИНИ ТА ЧАСУ ЖИТТЯ**

### 3.1. Опис вимірювального стенду

Для реалізації методу рухомої світлової смужки, потрібно щоб вимірювальний стенд задовольняв певні умови:

1) плоский фронт дифузії:

$$L \geq 5w$$

Де  $L$ -довжина смужки, а  $w$ - її ширина

У нашому випадку  $w=1,5$  мм, а  $L=25$  мм: дана умова виконується;

2) частота проходження імпульсу  $T$  повинна бути такою щоб  $T \geq 5\tau$

У нашому випадку частота проходження  $1000 \Gamma\mu = 1 \kappa \Gamma\mu$ , ширина імпульсу  $=180$  мкс. Тобто імпульси не перекриваються.

3) постійна часу фронту  $t_f$  світлового імпульсу повинна бути « очікуваного значення  $\tau$ . В нашому випадку  $t_f \approx 1$  мкс.

Оскільки постійні часу фронту імпульсу фото-Е.Р.С. залежать від рівня інжекції зазвичай передній фронт коротший ніж задній (не лінійність процесу рекомбінації), то було прийнято рішення для однозначності виміру постійної часу експоненти використовувати лише такі рівні інжекції, за яких постійні часу переднього і заднього фронтів однакові, що є ознакою лінійності процесу рекомбінації.

Для реалізації наведених вище умов вимірювання використаний стенд для дослідження рекомбінаційно-дифузійних параметрів, який дозволяє в найбільш повній мірі реалізувати метод вимірювання дифузійної довжини (наприклад метод Вальдеса). Що до визначення часу життя, то рух світлової смужки періодично зупинявся, фіксувалась відстань і амплітуда релаксаційної характеристики в умовних одиницях по екрану осцилографа, після чого за допомогою системи АДС визначалися значення постійної часу переднього і заднього фронтів імпульсу фото-Е.Р.С.

Релаксаційна характеристика фото – ЕРС, отримана імпульсною світловою інжекцією, характеризує рекомбінаційні процеси у часовому вимірі. У разі лінійної рекомбінації значення часу життя не рівноважних носіїв заряду не повинно залежати від рівня світлової інжекції. Таким чином, по параметрам релаксаційної характеристики можна визначити не тільки час життя, але і оцінити реальний перебіг рекомбінаційних процесів, наприклад виявити наявність рівнів прилипання та інше.

Імпульсна світлова інжекція використовується також для визначення дифузійної довжини не рівноважних носіїв заряду методом рухомої світлової смужки (метод Вальдеса) і у цьому режимі вона характеризує рекомбінаційні процеси у координатному вимірі.

Час життя і дифузійна довжина, визначені у однакових фото – інжекційних умовах, пов'язані між собою коефіцієнтом дифузії:  $L^2 = D \tau$

Суміщення двох різних методик у одному вимірювальному стенді вимагає такої послідовності у проведенні вимірювань: на поверхні зразка формуються два контакти метал – напівпровідник, один з яких обов'язково повинен бути бар'єрним (у подальшому – «активним»), щоб поле потенціального бар'єру просторово розділяло електронно – діркові пари, які генерує світлова смужка. Другий контакт, не обов'язково бар'єрний, (у подальшому – «пасивний»),

У разі імпульсно модульованої світлової смужки фото – ЕРС, яка утворюється між «активним» і «пасивним» контактами, також буде імпульсна.

Головною перевагою даного стенду над аналогами, які були наведені у розділі 2 є те, що даний стенд в одному циклі і у однакових інжекційних умовах може вимірювати як час життя, так і дифузійну довжину, тобто часову і координатну характеристику, що дає можливість у кінцевому підсумку визначити і коефіцієнт дифузії.

На рисунку 3.1 зображено розроблений експериментальний стенд, який був використаний у ході наших досліджень.

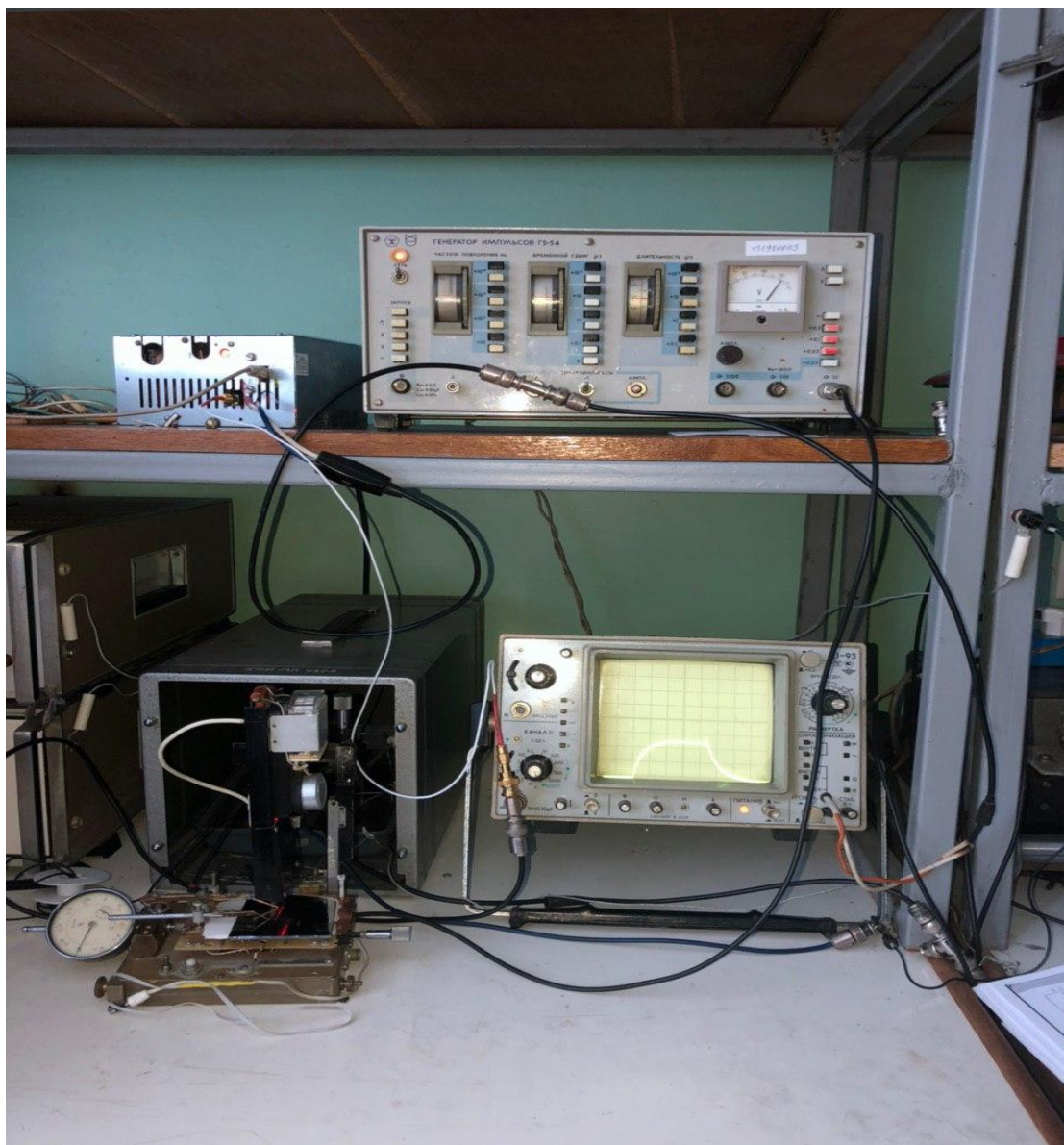


Рисунок 3.1 – Фотознімок експериментального стенду для одночасного вимірювання дифузійної довжини та часу життя

Складається з маніпулятора, який дозволяє переміщувати смужку на відстань, яку фіксує мікрометричний індикатор. на якому розміщений надійно зафіксований зразок монокристалічного кремнію з 4 бар'єрними контактами. До бар'єрних контактів під'єднуються пасивний і активний контакти, які мають вигляд голки, вони служать для зняття фото-Е.Р.С., що утворюється між активним і пасивними контактами і візуалізується на екрані осцилографа. Джерело імпульсного світлового потоку виконано на 6 лінійно світлодіодів червоного діапазону фокусуючою лінзою

напівкруглого перерізу. Струм через діоди обмежується резистором також в приборі використовується система контролю струму через діоди (рис. 3.2):



Рисунок 3.2 – Вид столика зверху (індикатор струму)

Зверху над світлодіодами розташований індикатор струму через світлодіоди(якщо повне відхилення  $4 \text{ mA}$ ) щоб не перевищити допустимий струм, а саме  $20 \text{ mA}$  (для обраних світлодіодів). Джерело живлення світлодіодів імпульсний генератор, що розташований з верхнього правого боку від стенду. З правої сторони розташований осцилографічний реєстратор імпульсів, який використовується, як пристрій для зняття координатних характеристик під час руху зразка відносно світової смужки.(вхідний опір)Вимірюється фото-Е.Р.С. а не різниця потенціалів

Релаксаційна характеристика реалізується на екрані осцилографа і одночасно подається на аналогово-цифровий перетворювач для визначення постійних часу фронтів. Залежність амплітуди релаксаційної характеристики від відстані визнач у відносних одиницях на екрані осцилографа із урахуванням показань цифрового індикатора відстані. Дані залежності амплітуди релаксаційної характеристики від відстані від відстані заносяться у таблицю аналогово цифрового перетворювача, апроксимуються експоненціальною функцією. Для обробки результатів по дифузійній довжині та часу життя використовується програм Origin 8.5.

### **3.2. Вимірювання дифузійної довжини та релаксаційної характеристики часу життя**

Релаксаційна характеристика фото – ЕРС, отримана імпульсною світловою інжекцією, характеризує рекомбінаційні процеси у часовому вимірі. У разі лінійної рекомбінації значення часу життя не рівноважних носіїв заряду не повинно залежати від рівня світлової інжекції. Таким чином, по параметрам релаксаційної характеристики можна визначити не тільки час життя, але і оцінити реальний перебіг рекомбінаційних процесів, наприклад виявити наявність рівнів прилипання та інше.

Імпульсна світлова інжекція використовується також для визначення дифузійної довжини не рівноважних носіїв заряду методом рухомої світлової смужки (метод Вальдеса) і у цьому режимі вона характеризує рекомбінаційні процеси у координатному вимірі.

Час життя  $\tau$  і дифузійна довжина  $L_d$ , визначені у однакових фото – інжекційних умовах, пов'язані між собою коефіцієнтом дифузії:  $L_d^2 = D\tau$ .

Суміщення двох різних методик у одному циклі вимагає такої послідовності у проведенні вимірювань: на поверхні зразка формуються два контакти метал – напівпровідник, один з яких обов'язково повинен бути бар'єрним (у подальшому – «активний»), щоб потенціальне поле бар'єру просторово розділяло електронно –

діркові пари, які генерує світлова смужка. Другий контакт може бути не обов'язково бар'єрним (у подальшому – «пасивний»).

У разі імпульсної модульованої світлової смужки фото – ЕРС, яка утворюється між «активним» і «пасивним» контактами, також імпульсна.

Амплітуда імпульсної фото – ЕРС залежить від відстані  $x$  між світловою смужкою і «активним» контактом, а саме: зі збільшенням  $x$  амплітуда імпульсної фото – ЕРС  $V(x)$  зменшується внаслідок рекомбінації. Якщо залежність  $V(x)$  з достатньою точністю апроксимується експонентною функцією, то по ній можна визначити дифузійну довжину не рівноважних носіїв заряду  $L_d$ .

Для визначення дифузійної довжини та часу життя  $\tau$  рух смужки тимчасово періодично зупиняється і фіксуються значення відстані між «активним» контактом і світловою смужкою та постійні часу переднього фронту  $\tau_{пф}$ , якій формується двома процесами: генерацією і рекомбінацією електронно – діркових пар, і заднього фронту  $\tau_{зф}$ , якій формується лише процесом рекомбінації електронно – діркових пар.

У зальному випадку довільного рівня світлової інжекції кількісні значення  $\tau_{пф}$  і  $\tau_{зф}$  неоднакові, а саме:  $\tau_{пф} > \tau_{зф}$  і залежать від рівня інжекції, що є ознакою нелінійної рекомбінації.

Умовою лінійності процесу рекомбінації є рівність  $\tau_{пф} = \tau_{зф} = \tau$ , яка досягається зменшенням рівня інжекції і, відповідно, амплітуди фото – ЕРС.

Густина світлового потоку, якій формує інжекційну світлову смужку, постійна і однакова як для визначення дифузійної довжини, так і для визначення часу життя, але рівень інжекції зменшується внаслідок віддалення смужки від «активного» контакту і рекомбінації носіїв заряду і незалежно змінювати густину світлового потоку смужки неможливо.

Виконання умов лінійності процесу рекомбінації може відбуватися за таких малих значень амплітуди фото – ЕРС, які важко буде визначити з достатньою точністю і цим обмежуються можливості суміщення двох різних методик у одному циклі вимірювання дифузійної довжини  $l$ , особливо, часу життя та, у кінцевому підсумку, коефіцієнта дифузії не рівноважних носіїв заряду.

Суть методу полягає в наступному: на поверхні досліджуваного зразка створюється світлова смужка, яка може переміщуватися по світлочутливої поверхні відносно «активного» контакту. В освітленій області створюються надлишкові носії заряду, які дифундують, досягають «активного» контакту, розділяються потенціальним полем. Наслідком розділу електронно-діркових пар є фото-Е.Р.С. між «активним» і пасивним контактами.

Рух світлової смужки періодично зупинявся, фіксувалась відстань і амплітуда релаксаційної характеристики в умовних одиницях по екрану осцилографа.

На першому етапі ми розробили та сконструювали вимірювальний стенд. Налаштування даного вимірювального стенду розроблено так, щоб початкове значення сигналу відповідало початковому положенню світлової смужки на бар'єрному контакті, а це відповідає максимальному значенню амплітуди. Потім смужку пересували на відповідно зазначену відстані від контакту. Після паузи та фіксації амплітуди сигналу на екрані осцилографа, рух повторювали на однаковій відстані тощо, щоб досягти рівнів шуму (перешкод).

Нами не було досягнуто класичної експоненціальної залежності амплітуди від відстані між смужкою і колектором. А отримані значення використовувати лише для однорідності кристалу по цьому параметру.

Амплітуда імпульсної фото – ЕРС залежить від відстані  $x$  між світловою смужкою і «активним» контактом, а саме: зі збільшенням  $x$  амплітуда імпульсної фото – ЕРС  $V(x)$  зменшується внаслідок рекомбінації. Якщо залежність  $V(x)$  з достатньою точністю апроксимується експонентною функцією, то по ній можна визначити дифузійну довжину  $L$  не рівноважних носіїв заряду.

Для визначення дифузійної довжини рух смужки тимчасово періодично зупинявся і фіксувалися значення відстані  $x$  між «активним» контактом і світловою смужкою та амплітуда імпульсної фото – ЕРС  $V(x)$ . Імпульсний струм через світлодіоди підтримується незмінним, що забезпечує незмінний рівень інжекції. Отримана таким чином залежність  $V(x)$  оцифровується АЦП, апроксимується експоненціальною функцією і визначається середнє значення шляху, пройденого не рівноважними носіями заряду за час життя, який і є дифузійною довжиною  $L$ .

Як було вище вказано після зупинки фіксувалися амплітуда і відстань. По залежності амплітуди фото-Е.Р.С. від відстані (дані наведені в табл. 3.1). Як і пропонується у методі Вальдеса, були відкинуті деякі початкові і кінцеві точки отриманої характеристики (Додаток А).

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання на контактах (1-3)

	Kord(X)	Ampl(Y)
Long Name	Koord	
Units	MkM	
Comments		
1	0	
2	10000	
3	20000	7
4	30000	11
5	40000	19
6	50000	24
7	60000	33
8	70000	42
9	80000	55
10	90000	65

Апроксимувавши експоненціальну залежність (рис.3.3) було отримано значення дифузійної довжини.

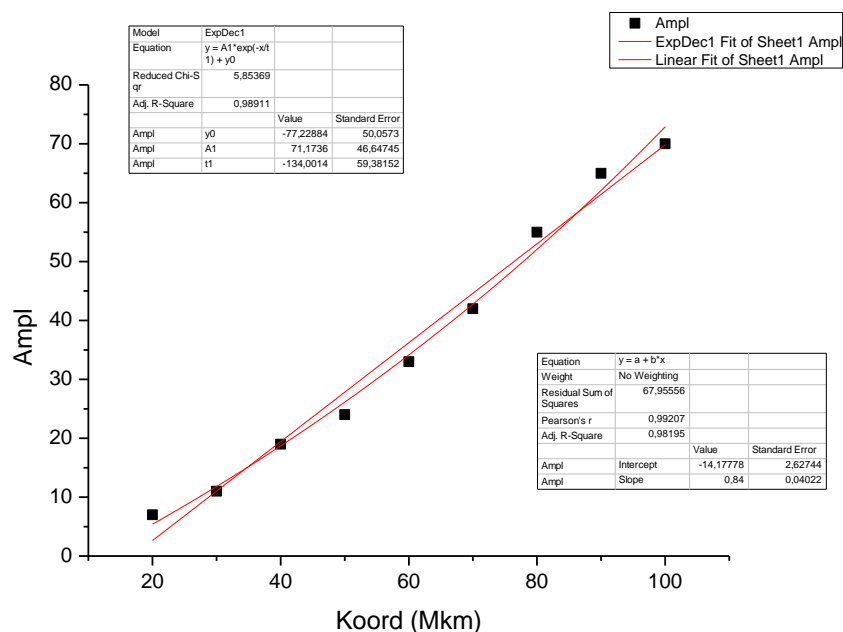


Рисунок 3.3 -Експоненціальний спад фото-ЕРС

Рух смужки зупинявся на певній відстані по залежності амплітуди від відстані до активного контакту і експоненційній апроксимації цієї залежності була розрахована довжина і похибка апроксимації таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення дифузійної довжини та похибки при розрахунках, контакти (1-3)

	A	B	C	D
1	Model	ExpDec1		
2	Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$		
3	Reduced Chi-Sqr	5,85369		
4	Adj. R-Square	0,98911		
5			Value	Standard Error
6	Ampl	y0	-77,22884	50,0573
7	Ampl	A1	71,1736	46,64745
8	Ampl	t1	-134,00148	59,38152

Значення залежності амплітуди фото-Е.Р.С. від довжини на наступній парі контактів можна побачити в (табл. 3.3)

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання на контактах (2-3)

	Koord(X)	Ampl(Y)
Long Name	Koord	
Units	MkM	
Comments		
1	0	7
2	10	12
3	20	17
4	30	25
5	40	34
6	50	41
7	60	52
8	70	57
9	80	68
10	90	71
11		

Апроксимувавши експоненціальну залежність(рис.3.4) було отримано значення дифузійної довжини.

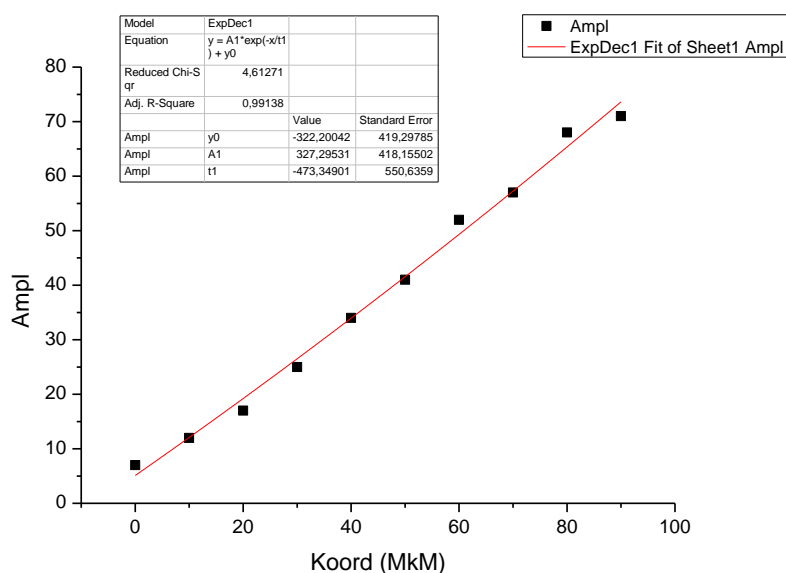


Рисунок 3.4 -Експоненціальний спад фото-ЕРС

Таблиця 3.4 – Значення дифузійної довжини та похибки при розрахунках, контакти (2-3)

Model	ExpDec1	
Equation	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$	
Reduced Chi-Sqr	4,61271	
Adj. R-Square	0,99138	
	Value	Standard Error
Ampl	y0	-322,20042 419,29785
Ampl	A1	327,29531 418,15502
Ampl	t1	-473,34901 550,6359

Таблиця 3.5 – Спільний результат вимірювання на контактах(1-3,2-3)

	Koord(X)	A1(Y)	Ampl1(Y)	Ampl2(Y)
Long Name				
Units	Mkm			
Comments				
1	20	12	7	17
2	30	18	11	25
3	40	26,5	19	34
4	50	32,5	24	41
5	60	42,5	33	52
6	70	49,5	42	57
7	80	61,5	55	68
8	90	68	65	71
9	100	–	70	
10				

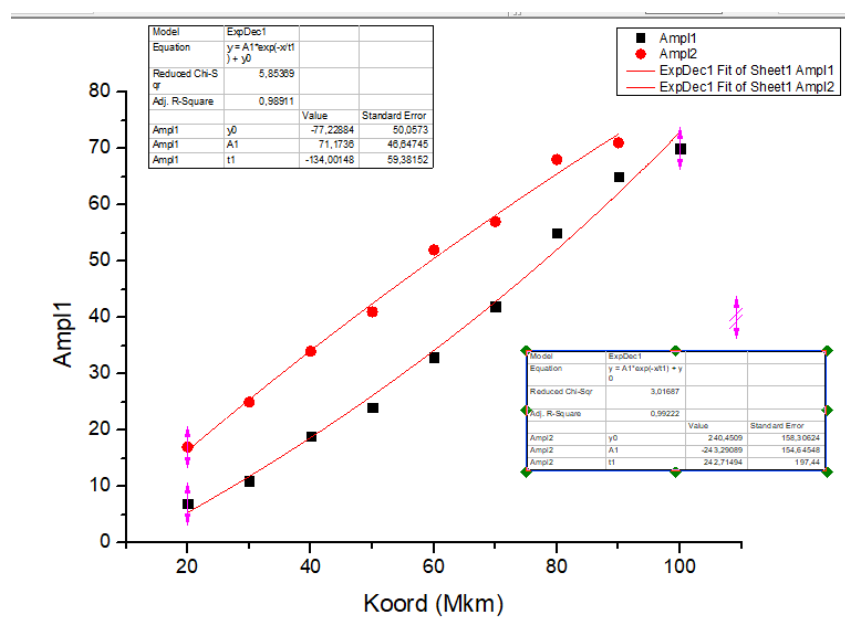


Рисунок 3.5 -Експоненціальний спад фото-ЕРС на контактах(1-3,2-3)

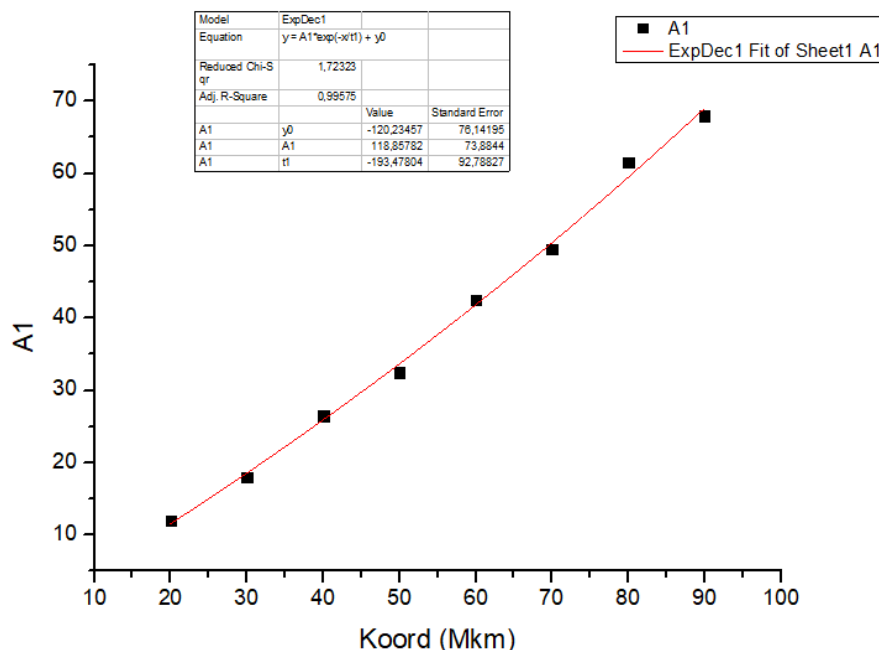


Рисунок 3.5 -Експоненціальний спад фото-ЕРС на контактах(1-3,2-3)

#### Визначення часу життя

Умовою лінійності процесу рекомбінації є рівність постійних часу переднього  $\tau_{пф}$  і заднього  $\tau_{зф}$  фронтів релаксаційної характеристики, яка досягається зменшенням рівня інжекції  $i$ , відповідно, амплітуди фото – ЕРС.

Густина світлового потоку на "активному" контактi, якій формує інжекційну смужку підтримується постійною, Змінювати густину світлового потоку смужки у процесі її переміщення для визначення дифузійної довжини недопустимо.

Виконання умови лінійності процесу рекомбінації може відбуватися за таких малих значень амплітуди фото – ЕРС, за яких важко буде визначити з достатньою точністю і дифузійну довжину, і час життя.

У той же час. задній фронт, на відміну від переднього, формується виключно процесом рекомбінації. Умовою лінійності процесу рекомбінації по задньому фронту є незалежність часу життя від рівня інжекції.

Залежність часу життя рівня інжекції визначається по задньому фронту релаксаційної характеристики в умовах нерухомої світлової смужки, розташованої на "активному" контактi. Рівень інжекції змінюється за рахунок зміни струму через

світло діоди (рис.). Експериментальні дані, наведені на рисунку, свідчать про те, що певна залежність часу від рівня інжекції є, але вона у межах інструментальної похибки вимірювального стенда  $<14\%$  і таку залежність можна не враховувати.

Показана залежність амплітуди і постійної часу переднього і заднього фронтів (релаксаційної характеристики) між «активним» контактом і пасивним

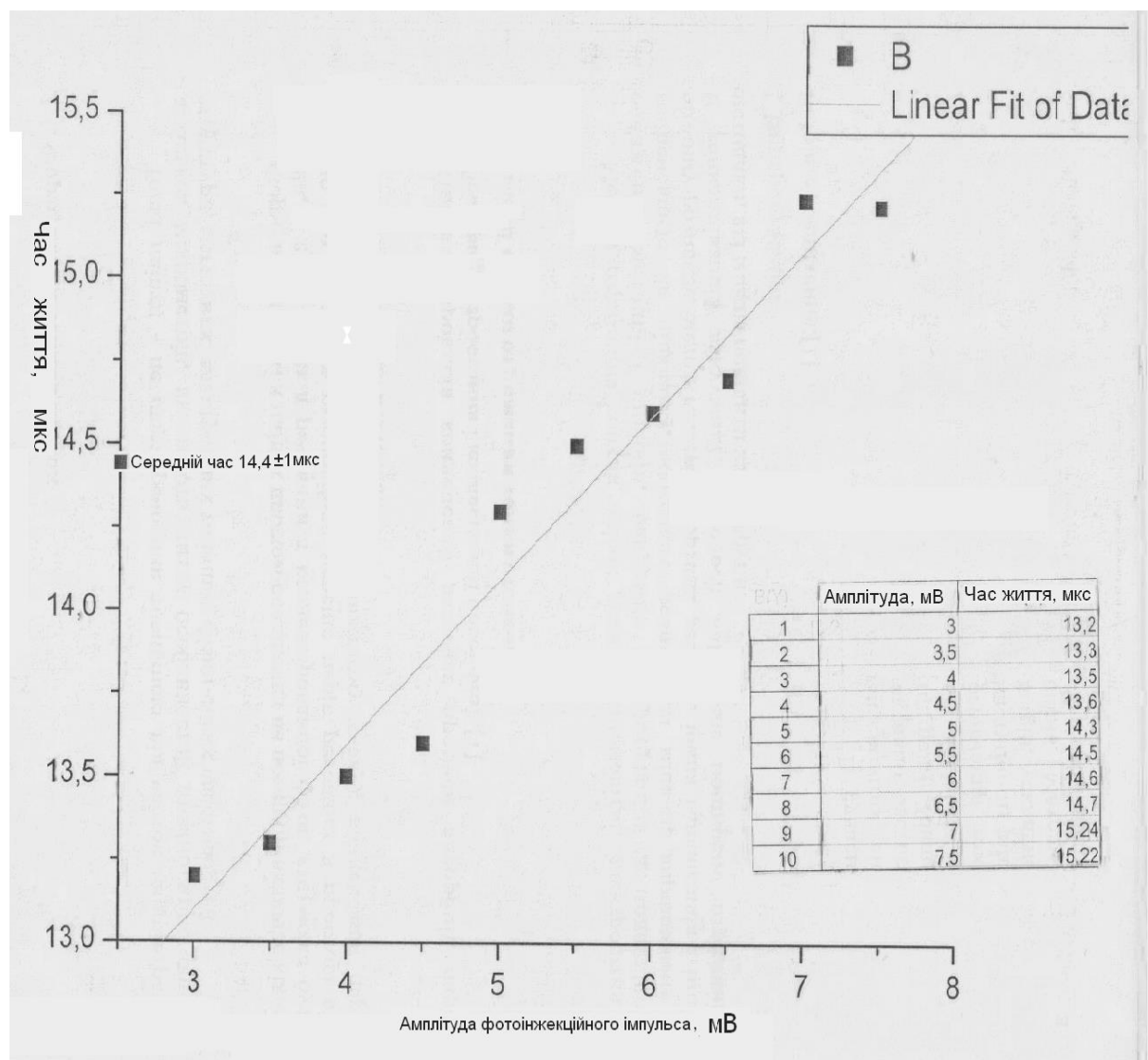


Рисунок 3.5 -Залежність часу життя від рівня інжекції

### 3.3.Обробка результатів вимірювань

Після того як результати були отримані та проаналізовані у вигляді залежності амплітуди фото-ЕРС від відстані між смугою та контактом колектора, виявилось, що не всі зразки демонструють експоненціальний розпад, а швидше лінійний. Через

те, що умови вимірювання були однаковими для всіх зразків за рівнем інжекції та шириною світлової смуги з лінійним зменшенням амплітуди, було відмічено зниження на 0,37 від вихідного значення. У зв'язку з цим довжина дифузії визначалася на відстані, необхідного для зменшення амплітуди в 2,7 рази (на рівні 0,37 від максимуму) для всіх зразків. Таким чином, незважаючи на відхилення від експоненціального закону, вдалося порівняти результати вимірювань на різних кристалічних ділянках та зразках, а також визначити відхилення значень локальної довжини дифузії від середнього значення довжини дифузії для кожного кристала в цілому.

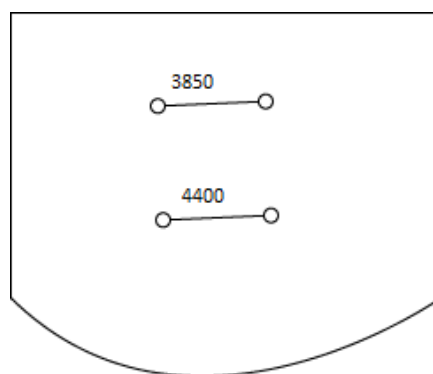


Рисунок 3.7- схематичне зображення зразка

$$L_{D1-3}=134\text{мм}$$

$$L_{D2-3}=473\text{мм}$$

$$L_{D\text{сер}}=303,5\text{мм}$$

Також значення часу життя становить:

$$\tau \approx 42,5 \text{ мкс}$$

$$\tau_{2-3} \approx 64 \text{ мкс}$$

$$\tau_{\text{сер}} \approx 53,25 \text{ мкс}$$

$$D = L_d^2 / \tau \tag{3.1}$$

$$D_{1-3} \approx 422,5 \text{ мм}^2 / \text{мкс}$$

$$D_{2,3} \approx 3495,7 \text{ мм}^2/\text{мкс}$$

$$D_{\text{сер}} \approx 1729,8 \text{ мм}^2/\text{мкс}$$

Експериментальні дані:

Дифузійна довжина  $L = 73632 \text{ мкм} = 0,73 \text{ мм} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Час життя  $\tau = 14,4 \text{ мкс}$

Розрахунок коефіцієнта дифузії по експериментальним даним

$$D = L_d^2 / \tau \approx 0,005329 / 0,000014 = 38,06 \text{ см}^2/\text{с} \quad (3.1)$$

Розрахунок дифузійної довжини по мобільності  $\mu_n = 0,135 \text{ в}^2/\text{А} \cdot \text{н}$

$i$  по експериментальному значенню часу життя

$k_B$  – постійна Бльцмана,  $T = 300 \text{ К}$ ,  $e$  – заряд електрона

Зрівнявши параметри з табличними, ті що наведені у джерелі 3 (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 - Основні параметри германію, кремнію та арсеніду галію (при температурі 300 К [4]).

Параметр	Германій	Кремній	Арсенід галію
Коефіцієнт дифузії, см <sup>2</sup> /с :			
Електронів	94	36	290
дірок	44	12,5	12
Час життя носіїв, с	10 <sup>-5</sup>	2,5 · 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup>

З чого слідує, що час життя в пластинах кремнію, виявився досить малим, результатом чого є один недолік. Основний недолік полягає у тому, що не виконується одна з критеріїв методу, а саме зразок має бути набагато товщим ніж той що застосовувався в нашій роботі. Під час вимірювання, частина хвиль

світлового потоку відбивалася від зразка, через що і не вдалося правильно виміряти час життя.

### **Висновки до розділу 3**

У даному розділі було розроблено і виготовлено конструкцію вимірювального стенду, його складові частини, опрацьовано їх призначення у виконанні вимірювальної роботи та визначено дифузійну довжину та час життя. Також було розглянуто принципи вимірювання кожного параметру одночасно. Тобто стенд дав змогу вимірювати дифузійну довжину та час життя методом фото-інжекції. Час життя визначається при зупинці зразка на певній відстані по амплітуді та за допомогою програми ADC, що дозволяє на комп'ютері фіксувати релаксаційну характеристику часу життя по передньому і задньому фронтах. Дифузійна довжина фіксувалася за допомогою мікрометра та після подальшої апроксимації експоненціальної залежності по отриманим точкам, була визначена дифузійна довжина між двома парами контактів. Також був визначений коефіцієнт дифузії розрахунковим методом.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення вимірювального стенду для <b>одночасного</b> вимірювання координатних та часових характеристик пластин монокристалічного кремнію	Лабораторії, для навчання студентів	Можливість одночасного збору даних (визначення дифузійної довжини та часу життя за однакових умов)
	Для визначення ККД в пластинах кремнію, що призначені для виготовлення фотоперетворювачів	

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конку-рентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1	Призначення	навчання студентів, лабораторні дослідження	навчання студентів, лабораторні дослідження	навчання студентів, лабораторні дослідження	навчання студентів, лабораторні дослідження		+	
2	Можливість підключення до цифрових систем	так	ні	ні	ні			+
3	Можливість одночасного визначення параметрів	так	ні	ні	ні			+
4	Розміри	Має менші розміри у порівнянні з	-	-	-			+
5	Безпечність у	+	+	+	+		+	

використанні							
--------------	--	--	--	--	--	--	--

У таблиці 4.2 під конкурентом 1 мається на увазі Установка для визначення дифузійної довжини методом світлового зонда , під конкурентом 2 мається на увазі Мікроелектронний пристрій для визначення дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в напівпровідниках, під конкурентом 3 мається на увазі використання установки ЖАЛО.

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої реалізувано ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

Таблиця 4.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно-логій
1	Створення вимірюваного стенду	Створення вимірюваного стенду для одночасного вимірювання координатних та часових характеристик пластин монокристалічного кремнію	Наявні	Доступна
		Створення вимірюваного стенду для одночасного вимірювання координатних та часових характеристик пластин монокристалічного кремнію з можливістю підключення до цифрових систем	Наявні	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Створення вимірюваного стенду для одночасного вимірювання координатних та часових характеристик пластин монокристалічного кремнію з можливістю підключення до цифрових систем, процес рішення описано у третьому розділі .				

#### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	На етапі впровадження невідомий
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25%

На сьогоднішній час ринок є потенційно привабливим, рентабельність доволі висока.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Можливість вивчення визначення найважливіших електрофізичних параметрів, таких як дифузійна довжина, час	Державні інститути, університети, дослідні лабораторії	-	Легкість, простота в використанні; точність та одночасність отримання

життя та коефіцієнт дифузії в лабораторних умовах			даних
---	--	--	-------

Дослідивши потенційні групи клієнтів проведено аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають. Фактори в таблиці викладені в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестача кваліфікованих кадрів	Необхідність кваліфікованих спеціалістів	Навчання персоналу
2	Низький попит на продукт	Низький попит на продукт на початку впровадження проекту через відсутність інформації щодо нього	Рекламне просування товару серед потенційних клієнтів

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зниження вартості проекту	Зменшення ціни виробництва	Зменшення кінцевої вартості товару
2	Зростання попиту	Збільшення кількості потенційних клієнтів	Збільшення обсягів виробництва та продажу
3	Погіршення позицій конкурентів	З виходом проекту на ринок відбудеться зниження попиту на товари конкурентів	Збільшення обсягів виробництва та продажу

Таблиця 4.8 – 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 олігополія	На ринку присутні лише декілька основних виробників	Збільшення кількості корисних функцій товару порівняно з конкурентом, якості товару та зменшення вартості
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Ринок виробництва може не обмежуватись національним рівнем	Зосередженість на особливостях національного ринку, а згодом вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається в межах однієї галузі	Зменшувати кінцеву вартість, впровадження новітніх технологій і т.д.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якості та особливості товару
5. За характером конкурентних переваг нецінова	Конкуренція заснована на різному функціоналі	Впровадження технологій та кількості корисних функцій товару порівняно з конкурентом
6. За інтенсивністю немарочна	Роль торгової марки є незначною, але відомі марки присутні на ринку	Проведення рекламного просування продукту серед потенційних клієнтів

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Див. табл. 4.2	Немає	Дослідні лабораторії	університети та лабораторії	Замінники в немає
Висновки:	Інтенсивність конкуренції є достатньо висока	Потенційних конкурентів немає	При збільшенні вартості виробництва, збільшується вартість продукту	Легкість, простота в використанні; точність та одночасність отримання даних	Обмежень немає

Висновок: можливість виходу продукту на ринок існує. Щоб бути конкурентоспроможним, необхідно мати кращий функціонал та однакову або меншу ціну з конкурентами.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Ціна нижче за ціну конкурентів
2	Простота застосування	Продукт простий в використанні; дає точність та одночасність отримання даних,
3	Безпечність	Використання продукту не повинно створювати ризиків для здоров'я людини та оточуючого середовища.
4	Можливість проведення одночасного вимірювання даних	Великою перевагою продукту є можливість одночасного вимірювання координатних та часових характеристик пластин монокристалічного кремнію

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з моїм проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	15				+			
2	Простота застосування	17					+		
3	Безпечність	14			+				
4	Можливість проведення одночасного вимірювання даних	10	+						

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Можливість проведення одночасного вимірювання даних	Слабкі сторони: на етапі впровадження проекту ціна
Можливості: Зниження вартості виробництва призведе до зниження кінцевої вартості продукту	Загрози: Збільшення ціни продукту за рахунок збільшення вартості виробництва

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Пошук інвестицій та потенційних клієнтів; налагодження виробництва, вихід на ринок	70 %	2 роки
2	Зменшення витрат на виробництво, вдосконалення роботи приладу, налагодження виробництва, вихід на ринок	85%	2 роки

За результатами аналізу було обрано альтернативу №2.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	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	Приватні підприємства	Готові	Низький	Висока	Складно
2	Університети та дослідні лабораторії	Готові	Високий	Середня	Просто

Було обрано цільову групу №2.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	2	За рахунок особливостей та функціоналу, що відрізняють товар від товару конкурентів	Ціна на виробництво продукту, простота, точність, можливість одночасного збору даних та безпечність застосування	диференціація

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	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 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність, простота та безпечність використання	Стратегія диференціації	Ціна на виробництво, точність, простота, можливість одночасного збору даних та безпечність застосування	Співвідношення ціна/якість, мінімізація затрат на виробництво, співпраця з університетами та лабораторіями

#### 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Можливість одночасного збору даних в лабораторних умовах	Більш якісний продукт з більшим функціоналом у порівнянні з конкурентами	Можливість одночасного збору даних (визначення дифузійної довжини та часу життя за однакових умов)

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Використання розпізнання за стисненням для підвищення якості та швидкості роботи методу розпізнання за стисненням		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Відносно низька ціна	М	Вр
	2. Безпечність застосування	М	Тх
	3. Простота використання	М	Тх
	4. Можливість одночасного збору даних в лабораторних умовах	М	Тл
	Якість: кожний виріб проходить тестування після виробництва		
Пакування: коробка			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія		
	Після продажу: обслуговування та доставка		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	-	5000 грн/од	100 000 грн і вище	2000-10000/од

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення через веб-сайт виробника	Встановлення контакту, інформування, зберігання, доставка, підтримка	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо реалізує продукцію власного виробництва

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Немає	Телефон, Інтернет, електронна пошта	Підвищення функціоналу порівняно з конкурентами	Поширення інформації про розробку та її характеристик серед потенційних клієнтів	Надійність, якість, унікальність

#### Висновки до розділу 4

Провівши аналіз, можемо зробити позитивний висновок щодо можливості ринкового впровадження проекту. Існуючі функціональні відмінності від конкурентів дозволяють мати суттєві переваги, що підвищує шанси успішного входження на ринок.

## ВИСНОВКИ

Для виконання завдань, поставлених у магістерській дисертації, були проведені аналіз та дослідження:

1) За результатами аналізу наявних методів визначення дифузійної довжини та часу життя був вибраний фотоінжекційний метод, а саме метод рухомої світлової смужки (метод Вальдеса);

2) для вимірювання вказаних параметрів, були відібрані пластин кремнію  $p$  – типу за різними рівнями легування, очищених методом поліруючого травлення;

3) для отримання активних (інжекційних) та пасивних вимірювальних контактів на поверхні пластини створювалася система із чотирьох контактів  $Al-Si$ , напилених у вакуумі через маску, вищезазначена технологія у подальших дослідженнях себе виправдала;

4) формування світлової смужки було сформовано із шести лінійно та щільно розташованих світлодіодів червоного діапазону;

5) амплітуда сигналу фото–ЕРС зчитувалася з екрану осцилоскопа у відносних одиницях з відносною похибкою  $\pm 5\%$ ;

6) відстань між смужкою та інжекційним контактом визначалася по шкалі мікрометра, із найменшою поділкою 10 мкм і похибкою  $\pm 5\%$ .

7) час життя визначався за допомогою аналогово-цифрового перетворювача в програмі АДС, де зчитувався постійні часу фото-Е.Р.С. переднього і заднього фронту.

8) був визначений коефіцієнт дифузії, та порівняний із показниками наведеними у літературі.

В результаті чого було підтверджено можливість суміщеного визначення часу життя та дифузійної довжини на одному і тому ж кристалі за однакових умов, з використанням одного й того ж джерела світла. Але для вимірювання, потрібна відсутність відбиття, активний контакт повинен бути розташований набагато даліше від границі ніж дифузійна довжина. Однак умова для розташування активного і пасивного контакту не була виконана у повній мірі. Цю неоднорідність можна

пояснити тим, що в процесі формування кристалу, відбувається зміна температури. В результаті чого кристал кремнію починає звужуватися і утворюється термонапружений стан, і при подальшому охолодженні кристалу нижче температури пластичності (700-800°C) виникає дислокація кристалічних ґраток. У поперечній площині нерівномірно абсорбуються домішкові атоми, що призводить до зростання швидкості рекомбінаційних процесів.

Оцінка ширини світлової смужки була здійснена за допомогою спеціального фотометра.

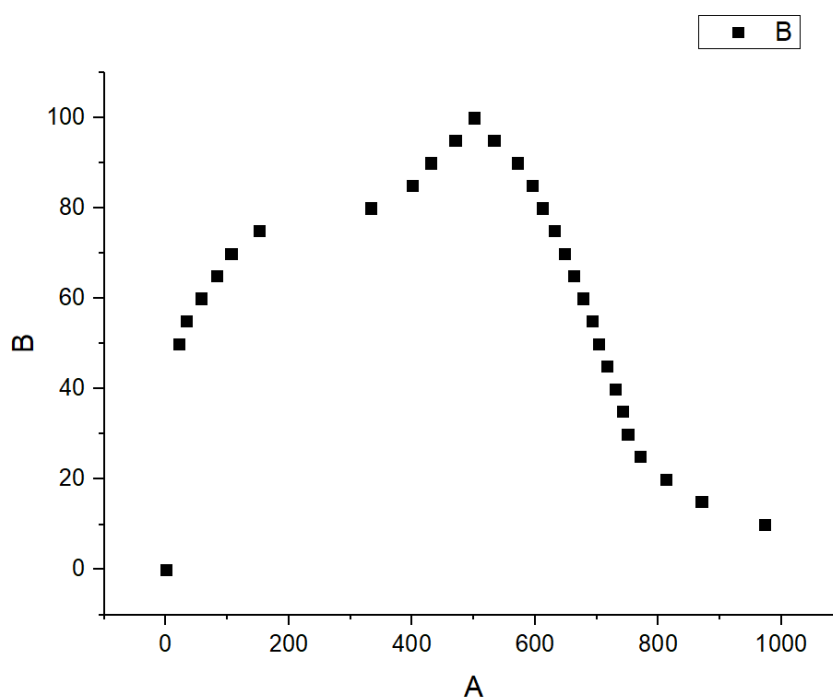


Рисунок 1 - Довжина світлової смужки

Рекомендації: стенд потребує подальшого вдосконалення, а саме зменшення розмірів щоб зробити його більш компактним та зручним, проведення ще декількох досліджень із пластинами, котрі б задовольняли вказані вище умови.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Global Solar Photovoltaic Panels Sales Market Report 2018: [Електрон.ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchmoz.us/global-solar-photovoltaic-panels-sales-market-report-2018-report.html>.
2. Поплавко Ю.М., Ільченко В.І., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Напівпровідники. Частина 4. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 342 с.
3. Борисов О.В. Твердотільна електроніка / О.В.Борисов, Ю.І.Якименко; за заг.ред. Ю.І.Якименка. –К.:НТУУ «КПІ», 2015.- 484 с.
4. Шалимов К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергоатомиздат. 1985. – 382 с.
5. Третьяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. У 2 т. Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – Т. 1. – 338 с.
6. Батавин В.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур/ В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
7. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Дуда Р.В. Огляд методів визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідниках // Технические науки. Электротехника и радиоэлектроника.. – 2013. – №6. – С. 18–21.
8. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках/ С.М. Рывкин. – Физматгиз., 1963. – 280 с.
9. Ковтонюк Н.Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов/ Н.Ф. Ковтонюк, Ю.А. Концевой – «Металлургия», 1970. – 432 с.
10. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников/ П. Блад, Дж.В. Оргон – Зарубежная радиоэлектроника, 1981. – 49 с.
11. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учеб. для вузов по спец. «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы»/ Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.

12. Травление полупроводников / перевод с английского С. Н. Горин. – Москва: Мир, 1965. – 363 с.
13. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Учебное пособие. Книга 4. Механическая и техническая обработка / С. Н. Никифорова-Денисова. – М.: Высшая школа, 1989. -95 с.
14. Третьяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. У 2 т. Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2009. – Т. 2. – 383 с.
15. Борисов О.В. Основи твердотільної електроніки / О. В. Борисов; за ред. Ю. І. Якименка. – К.: Освіта України, 2011. – 462 с.
16. Иванов В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. Справочник / Иванов В.И. Аксенов А.И. Юшин А.М. – М.: Энергоатомиздат, 1984. -
17. Бойко І. В. Мікропроцесори та мікроконтролери/ В. І. Бойко та ін. – К.: Вицашк., 2004. – 399 с.
18. Зазерин А. И. Активные фильтры на тонкопленочных пьезоэлектрических резонаторах : дисс. канд. техн. наук. : 05.27.01 – твердотельная электроника / Андрей Игоревич Зазерин. - Киев, 2016. - 244 с.
19. Офіційний сайт ІФФ НТУУ КПІ «ім.Ігоря Сікорського». Лабораторія вирощування монокристалів. – Режим доступу: <http://iff.kpi.ua/laboratoriya-viroshchuvannya-monokristaliv>
20. Мельник В. В. Формування нанокристалів кремнію в плівкових сплавах Si<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> та шаруватих структурах a-Si/Sn : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.07 "Фізика твердого тіла" / Мельник В. В. – Київ, 2019. – 21 с.
21. Гроза А. А. Ефект далекодії в конденсованих середовищах та його прояв у кремнії опроміненому високоенергетичними легкими іонами / А. А. Гроза, П. Г. Литовченко, М. І. Старчик, В. І. Хіврич, Г. Г. Шматко, В. І. Варніна // Ядер. фізика та енергетика. - 2010. - 11, № 1. - С. 66-73.
22. Оптичні та сенсорні властивості наноструктурованого кремнію, опроміненого високоенергетичними частинками (протони,  $\alpha$ -

частинки, важкі іони) / М. Л. Дмитрук, О. С. Кондратенко, М. Б. Пінковська, В. І. Хіврич, Л. О. Власукова, П. В. Кучинський // Укр. фіз. журн. - 2010. - 55, № 7. - С. 811-819.

23. Світлодіоди: фізика, технологія, застосування. В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась // Світлотехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 76. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/svitteh\\_2013\\_2\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/svitteh_2013_2_14).

24. Карась І.В. Світлодіоди: фізика, технологія, застосування: навч. посібник/ В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Х.: ХНАМГ, 2012, - 323 с.

25. Haigh D. G. Design optimization and testing of a GaAs switched-capacitor filter / D. G. Haigh, C. Toumazou, S. J. Harrold, K. Steptoe, J. I. Sewell, R. Bayruns // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1991. – Vol. 38, № 8. – P. 825–837.

26. Юрчук С.Ю., Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / Юрчук С.Ю., Диденко С.И., Кольцов Г.И. - М. : МИСиС, 2006. - 63 с.

27. Колосницын В.С., Стешенко П.П., Шульгов В.В. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / Учебное пособие написано в соответствии с учебной программой курса «Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы».

28. Зазерін А. І. Трансформація імпедансу як спосіб реалізації активних фільтрів на FBAR / А. І. Зазерін, А. Т. Орлов, О. В. Богдан // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” - Електроніка. – 2013. – № 764. – P. 30–35.

29. Mahon S. Bulk Acoustic Wave Devices - Why, How, and Where They are Going / S. Mahon, R. Aigner // Compound Semiconductor Manufacturing Technology Organization: CS MANTECH. – Austin, Texas, USA : 2007. – P. 15–18.30. Aota Y. P1H-4 FBAR Characteristics with AlN Film Using MOCVD Method and Ru/Ta Electrode / Y. Aota, S. Tanifuji, H. Oguma, S. Kameda, H. Nakase, T. Takagi, K. Tsubouchi // IEEE Ultrasonics Symposium, 2007. – 2007. – P. 1425–1428.

31. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

### ОПИС СТЕНДУ

Даний стенд має перевагу над аналогами, які були наведенні у розділі 2, стенд в одному циклі і у однакових інжекційних умовах може вимірювати як час життя, так і дифузійну довжину, тобто часову і координатну характеристику, що дає можливість у кінцевому підсумку визначити і коефіцієнт дифузії.

На рис. 3.1 зображений експериментальний стенд, який був розроблений та використаний у ході наших досліджень.

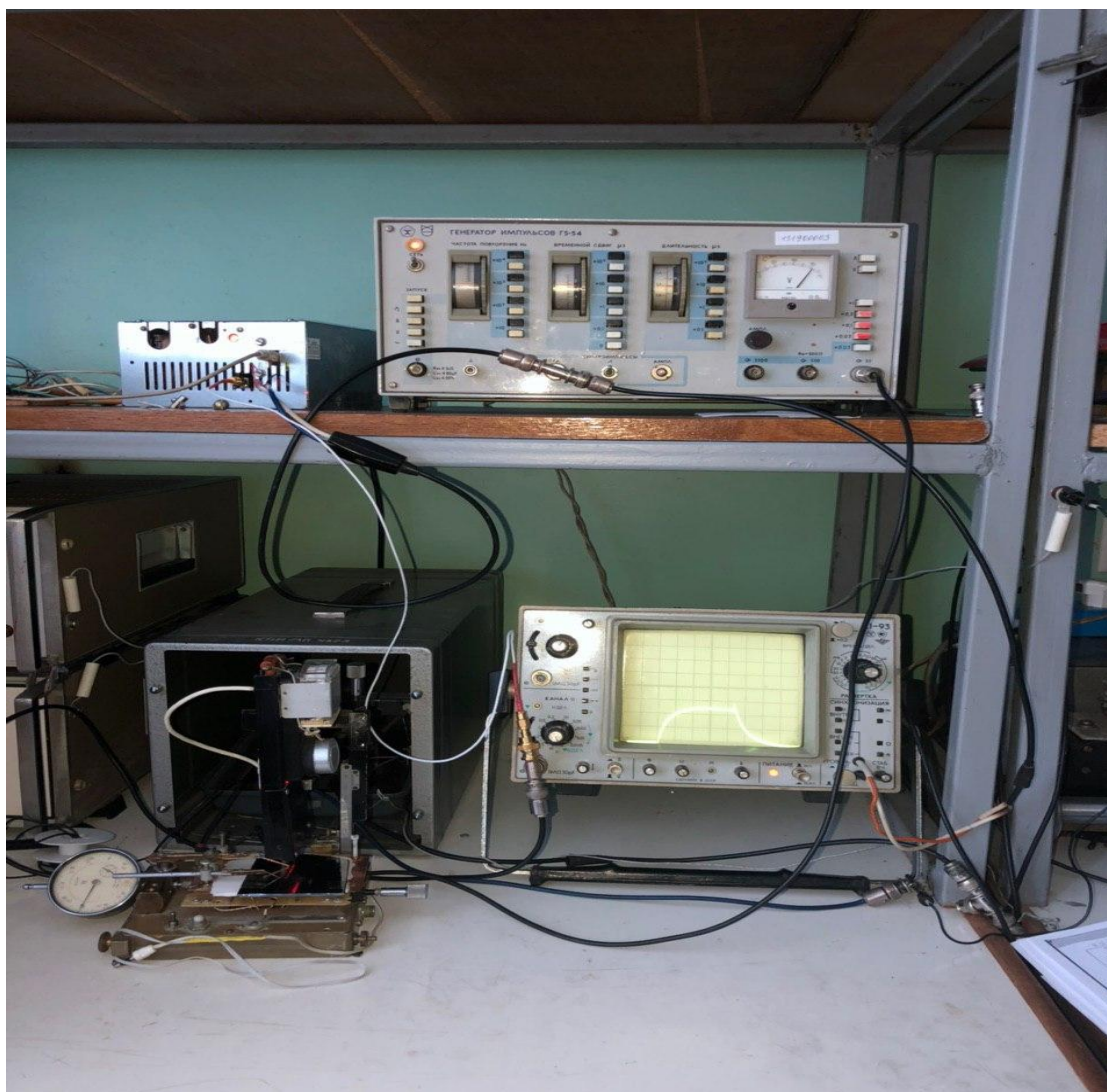


Рисунок А.1 – Фотознімок експериментального стенду для одночасного вимірювання дифузійної довжини та часу життя [18]

Складається з маніпулятора, який дозволяє переміщувати смужку на відстань, яку фіксує мікрометричний індикатор типу На передньому плані розташований рухомий столик, на якому розміщений надійно зафіксований зразок монокристалічного кремнію з 4 бар'єрними контактами. До бар'єрних контактів під'єднуються пасивний і активний контакти, які мають вигляд голки, вони служать для зняття фото-Е.Р.С., що утворюється між активним і пасивними контактами і візуалізується на екрані осцилографа. діє на зразок і відображається як вузька червона смужка. Джерело імпульсного світлового потоку виконано на 6 лінійно світлодіодів червоного діапазону фокусууючою лінзою напівкруглого перерізу. Струм через діоди обмежується резистором. Також в приборі використовується система контролю струму через діоди (рис. Д.2):



Рисунок А.2 – вид столика зверху(індикатор струму)

Зверху над світлодіодами розташований індикатор струму через світлодіоди (якщо повне відхилення  $4 \text{ mA}$ ) щоб не перевищити допустимий струм, а саме  $20 \text{ mA}$  (для обраних світлодіодів). Джерело живлення світлодіодів імпульсний генератор світлодіодів дає генератор імпульсів (змінного струму), що розташований з верхнього правого боку від стенду. Також столик має ще один пристрій, який і допомагає нам виміряти дифузійну довжину, це мікрометр із роздільною здатністю  $10 \text{ мкм}$ . З правої сторони розташований осцилографічний реєстратор імпульсів, який використовується, як пристрій для зняття координатних характеристик під час руху зразка відносно світової смужки. (вхідний опір) ерс а не різниця потенціалів

Аналоговий сигнал який надходить на вхід.

Релаксаційна характеристика реалізується на екрані осцилографа і одночасно подається на аналогово цифровий перетворювач для визначення постійних часу фронтів. Залежність амплітуди релаксаційної характеристики від відстані визнач у відносних одиницях на екрані осцилографа із урахуванням показань цифрового індикатора відстані. Дані залежності амплітуди релаксаційної характеристики від відстані від відстані заносяться у таблицю аналогово цифрового перетворювача, апроксимуються експоненціальною функцією. Для обробки результатів по дифузійній довжині та часу життя використовується програм Origin 8.5.

## АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Таблиця А.1 - Результати вимірювань та розрахунків (Варіант 1)

№ зразка	Опір Ом/□	Контакти	$L_D$ , мкм	Середнє $L_D$ , мкм	Різниця %
1	$12 \cdot 10^3$	1-2	3500	4200	±0,17
		3-4	4900		
2	$5,1 \cdot 10^3$	1-2	3850	4175	±8
		3-4	4500		
3	$2 \cdot 10^3$	1-2	5000	5950	±16
		3-4	6900		
4	90	1-2	3500	3625	±4
		3-4	3750		
5	0,046	1-2	2800	3250	±14
		3-4	3700		
6	$12 \cdot 10^3$	1-2	2900	3681	±22
		3-4	4375		

Таблиця А.2 - Результати вимірювань та розрахунків (Варіант 2)

№ зразка	Опір Ом/□	Контакти	$L_D$ , мкм	Середнє $L_D$ , мкм	Різниця %
1	$12 \cdot 10^3$	1-2	3500	4200	±17
		3-4	4900		
2	$5,1 \cdot 10^3$	1-2	3850	4125	±9
		3-4	4400		
3	$2 \cdot 10^3$	1-2	5000	5950	±16
		3-4	6900		
4	90	1-2	3500	3450	±2
		3-4	3400		
5	0,046	1-2	2800	3250	±14
		3-4	3700		
6	$12 \cdot 10^3$	1-2	2900	3637,5	±21
		3-4	4375		

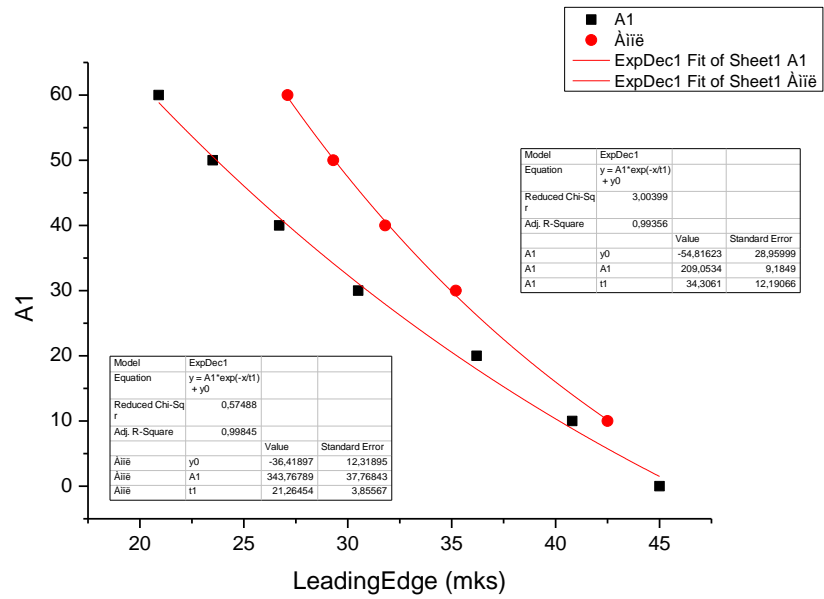


Рисунок А.3 –релаксаційні характеристики переднього і заднього фронтів, контакти(1-3)

Таблиця А.3 –Вимірянні значення для часу життя, контакти(1-3)

	LeadingEdg	A1(Y1)	TrailingEd	A1ië(Y2)
	mks		mks	
1		70		70
2	20,9	60	27,1	60
3	23,5	50	29,3	50
4	26,7	40	31,8	40
5	30,5	30	35,2	30
6	36,2	20		20
7	40,8	10	42,5	10
8	45	0		0
9				

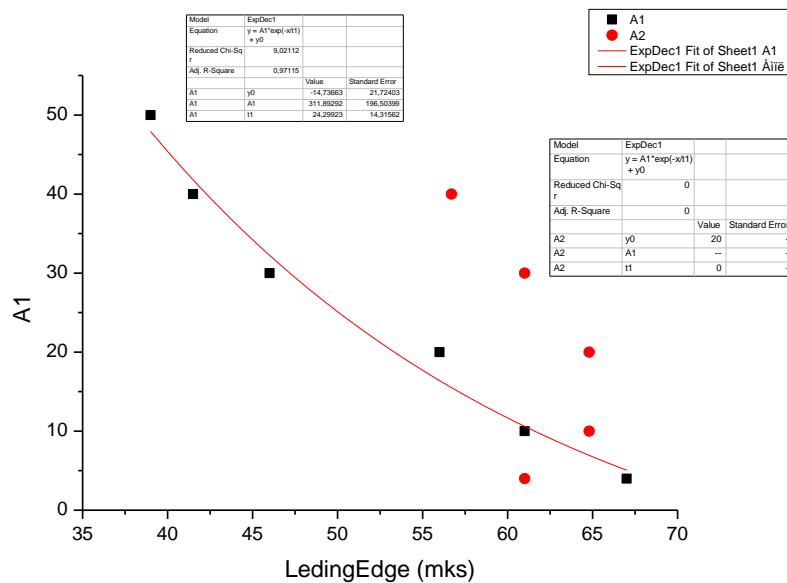


Рисунок А.4 –релаксаційні характеристики переднього і заднього фронтів,  
контакти(2-3)

Таблиця А.4 –Виміряні значення для часу життя, контакти(2-3)

	LedingEdge(	A1(Y1)	TrailingEd	A2(Y2)
	mks		mks	
1		70		70
2		60		60
3	39	50		50
4	41,5	40	56,7	40
5	46	30	61	30
6	56	20	64,8	20
7	61	10	64,8	10
8	67	4	61	4
9				