

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ДЕФЕКТНУ СТРУКТУРУ
КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Напрямок: 6.040203 – фізика

Спеціалізація: фізичне матеріалознавство

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4 курсу

Пристаї Олександр Віталійович

Науковий керівник:

доцент, канд. фіз.-мат. наук

Олій Олег Ярославович

Робота заслухана на засіданні кафедри

та рекомендована до захисту на ДЕК,

протокол № від 2014 р.

Зав. кафедрою загальної фізики

проф. Боровий М.О.

Київ, 2014

АНОТАЦІЯ

Пристаї О.В. Вплив зовнішніх факторів на дефектну структуру кремнієвих сонячних елементів.

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціалізацією «фізичне матеріалознавство». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ, 2014.

Науковий керівник: доцент, канд. фіз.-мат. наук Оліх О.Я., доцент каф. загальної фізики.

Проведено експериментальне дослідження властивостей кремнієвих сонячних елементів залежно від їх ступеня γ -опромінення в умовах монохроматичного освітлення. На основі двохдіючої моделі визначено струми насичення, фактори не ідеальності, напругу холостого ходу та струм короткого замикання. Використовуючи метод диференціальних коефіцієнтів визначено кількість типів глибоких рівнів, що ефективно приймають участь у рекомбінації, та енергію їх термічної активації. Проаналізовано вплив ультразвукового навантаження.

Ключові слова: сонячні елементи, глибокі рівні, γ -опромінення, ультразвукове навантаження.

АННОТАЦИЯ

Пристаї А.В. Влияние внешних факторов на дефектную структуру кремниевых солнечных элементов.

Квалификационная работа бакалавра по специализации «физическое материаловедение». - Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, физический факультет, кафедра общей физики. - Киев, 2014.
Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук Олих А.Я., доцент каф. общ. физики.

Научный руководитель: доцент, канд. ф.-м. наук, Олих О.Я., доцент каф. общей физики

Проведено експериментальне дослідження властивостей кремнієвих сонячних елементів в залежності від їх ступеня γ -облучення в умовах

монохроматического освещения. На основе двухдиодной модели определены токи насыщения, факторы не идеальности, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания. Используя метод дифференциальных коэффициентов определено количество типов глубоких уровней, эффективно участвуют в рекомбинации, и энергию их термической активации. Проанализировано влияние ультразвуковой нагрузки.

Ключевые слова: солнечные элементы, глубокие уровни, γ -облучения, ультразвуковая нагрузка.

SUMMARY

Prystay O. The influence of external factors on the defect structure of silicon solar cells.

Qualifying work degree on specialty "Physical Materials". - National Taras Shevchenko University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Physics. - Kyiv, 2014.

Research supervisor: Associate Professor, PhD. Sci. Science Olih O.J., associate chair. Society. physics.

An experimental study of the properties of silicon solar cells, depending on their degree of γ -irradiation on the monochromatic light. On the basis of the model are determined two diode saturation currents, factors are not ideality, open circuit voltage and short circuit current. Using the method of differential coefficients determined by the number of types of deep levels to effectively participate in recombination, and the energy of their thermal activation. Analyzed the influence of ultrasonic load.

Keywords: solar cells, deep levels, γ -irradiation, ultrasonic load.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	6
1.1 Сонячні елементи.....	6
1.2 Вплив ультразвуку на напівпровідникові структури.....	8
1.3 Еволюційні методи апроксимації.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	12
2.1 Зразки.....	12
2.2 Дослідна установка.....	13
2.3 Метод диференційних коефіцієнтів	14
РОЗДІЛ 3. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	17
3.1 ВАХ досліджених сонячних елементів.....	17
3.2 Параметри глибоких рівнів у кремнієвих р-п-структурах.....	19
ВИСНОВКИ.....	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	28

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку суспільства відбувається активний пошук альтернативних джерел енергії. Одним з найуживаніших варіантів є використання перетворювачів сонячної енергії. Ефективність сонячних елементів (СЕ) при використанні в енергетиці досягає приблизно 20%, тоді як максимально високий коефіцієнт корисної дії (ККД), отриманий у лабораторіях, порядку 40%. Отже, є потенціал до підвищення ККД і здешевлення технології виробництва.

Одним з напрямів дослідження є явища, пов'язані з механічними коливаннями пружного середовища, широко застосовуються у мікроелектроніці. Перед усім, мова іде про акустoeлектроніку, яка базується на взаємодії акустичних і електричних сигналів. В цій роботі висвітлюється застосування акустичних хвиль в якості активного інструменту впливу.

Відомо, що робочі характеристики різних напівпровідникових пристроїв у значній мірі визначаються їхнім дефектним складом. Відповідно, методи, які дозволяють керувати станом дефектів можуть служити інструментом, як динамічного, так і статичного керування властивостями таких пристроїв.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Сонячні елементи

Сонячний елемент (СЕ) за своєю будовою це діод з прозорою оболонкою через яку проходить світло для перетворення в електричну енергію. Складається з двох областей, *n* і *p* типу. Область *n* провідності це напівпровідник (НП), де основними носіями заряду є електрони. Для того, щоб отримати НП *n*-типу, власний НП легують донорами. Здебільшого це атоми, які мають на валентній оболонці на один електрон більше, ніж атоми напівпровідника, який легується. Область *p* провідності теж НП, але основними носіями заряду є дірки. Для отримання НП *p*-типу, власний НП легують акцепторами, тобто атомами з меншою валентністю. Сам контакт цих зон називається *p-n*-переходом, на якому виникає різниця потенціалів внаслідок дифузійного струму.

Внутрішній фотоефект - перерозподіл електронів по енергетичних рівнях у діелектриках і напівпровідниках під дією світла. Якщо енергія кванта $h\nu$ падаючого світла перевищує ширину забороненої зони в діелектрику або НП, то електрон, що поглинув квант, переходить із валентної зони в зону провідності. У результаті цього переходу утворюється пара носіїв: у зоні провідності електрон, а у валентній зоні – дірка. Таким чином, у зоні провідності з'являються носії заряду, які можуть переміщатись по НП.

Принцип роботи СЕ представлений, зокрема, в [1]. Оптичне випромінювання, яке падає на поверхню НП структури з *p-n*- переходом, створює біля поверхні пари електрон–дірка, концентрація яких поступово спадає вглиб НП в напрямку *p-n*-переходу. Також вже утворена електрон-діркова пара може переміщатись у НП на відстань довжини дифузії. Коли електрон-діркова пара наблизиться до *p-n*-переходу, то під дією його електричного поля вона розділяється. Електрони переходять в електронну, а дірки – в діркову зону *p-n*-переходу. Після чого, на зовнішніх контактах *p* і *n*-області НП з'являється різниця потенціалів, що призведе до струму на опорі навантаження. Таким чином, одночасно, з появою різниці потенціалів на зовнішніх електродах внаслідок освітлення відбувається зміна потенціального

бар'єру. Створена фото-електрорушійна сила (ЕРС) зменшує цей бар'єр, що, у свою чергу, призведе до появи додаткових зустрічних потоків електронів із n і дірок із p -області. Коли число створених світлом надлишкових електрон-діркових пар зрівняється з числом пар, які проходять через p - n -перехід, або через зовнішнє навантаження, встановиться стаціонарний стан. Як правило, це відбувається через тисячні долі секунди після початку освітлення.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) СЕ у першу чергу відрізняється від ВАХ НП діода появою члена I_{ph} і позначає собою струм, який генерується СЕ під дією світла. Струм I_d це частина струму I_{ph} , яка тече через діод, а друга частина I – через зовнішнє навантаження:

$$-I_{ph} = I_d + I \quad (1.1)$$

де

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

звичайна характеристика у темряві, в якій I_0 -зворотній струм насичення p - n -переходу; e -заряд електрона; T - абсолютна температура; k - постійна Больцмана; U -напруга.

Для реального СЕ характерна наявність послідовного опору R_s , який складається із послідовних опорів контактів і самого НП, а також паралельного R_{sh} , який відображає можливі потоки струму через опори паралельні p - n -переходу. Врахування цих опорів і рекомбінації у p - n -переході веде до розширеного виразу для ВАХ.

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(\exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) + \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

В подальшому детальне вивчення ВАХ СЕ, для більш точного опису поведінки струмів у СЕ дало вираз:

$$I(U) = -I_{ph} + I_{01} \left[\exp\left(\frac{e(U - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(\frac{e(U - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right] + \frac{U - IR_s}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

де I_{01} - зворотній струм насичення, визначається дифузійним механізмом протікання струму через тонкий р-п-перехід; I_{02} - зворотній струм насичення, виникає внаслідок рекомбінації в області р-п-переходу, n_1 і n_2 – параметри неідеальності і зазвичай дорівнюють приблизно 1 і 2.

1.2 Вплив ультразвуку на НП структури

Перспективним способом активного впливу на властивості кристалів є використання акустичних коливань ультразвукового (УЗ) діапазону. Серед переваг даного підходу можна виділити наступне: а) поглинання УЗ відбувається в місцях порушення періодичності кристалу, тобто з дефектами, і має локальний характер впливу; б) застосування хвиль різної поляризації і типу, що представлені у [2], дозволяє ще більше підвищити вибірковість впливу; в) шляхом підбору частоти впливу УЗ хвиль можна досягти резонансних перетворень в дефектній підсистемі, тобто знизити енергозатрати при тих же результатах.

Більш перспективне застосування УЗ вбачається для динамічного, оборотного змінювання властивостей НП під час їх роботи, також як додаткового фактора впливу на структуру матеріалу, яку перед цим вже обробили радіаційно чи термічно. Основою для такого припущення є те, що кристали підчас робочих умов і температур, часто знаходяться у нестійкому стані і їх дефектна структура може легко переналаштуватись під дією УЗ. В таких випадках можна використовувати УЗ значно меншої інтенсивності, що, у свою чергу, підвищить локалізацію впливу на дефектах.

З літератури відомо, що збудження пружних коливань дійсно може бути причиною зміни властивостей напівпровідникових пристроїв. Наприклад, в роботі [3] наведені результати дослідження впливу УЗ навантаження на кремнієві СЕ, де було зафіксовано покращення фотоелектричних параметрів, які, можливо, зв'язані зі збільшенням довжини дифузії електронів внаслідок перезарядки рекомбінаційних центрів.

В роботах [4,5] досліджували вплив УЗ деформації на поляризаційні та амплітудні властивості випромінювання НП лазерів. В якості об'єкта

дослідження використовувались структури InGaAs/InP, виміри проводились при кімнатній температурі і в імпульсному режимі. Було виявлено, що, при збереженні лінійної поляризації випромінювання, УЗ повертає напрям поляризації, а амплітуда відхилення однозначно пов'язана з величиною амплітуди модуляції довжини хвилі випромінювання.

В роботі [6] представлено підвищення пластичної деформації при незначному УЗ навантаженні за рахунок роботи дислокаційних джерел, тим самим створюють нові дислокації. Також знайдено частоту найбільшої ефективності УЗ навантаження.

1.3 Еволюційні методи апроксимації

Продуктивність роботи СЕ залежить від багатьох параметрів таких як: послідовний опір (R_s), паралельний опір (R_{sh}), фактор не ідеальності (n), фотострум (I_{ph}) і струм насичення (I_0). Таким чином, знання цих параметрів бажане для оцінки ефективності, якості і будови СЕ. Ці параметри можуть бути визначенні, описуючи СЕ одно-, дво-, чи трьох-діодними еквівалентними моделями, останні дві з яких більш точні за одно-діодну модель.

Існують аналітичні і числові методи визначення цих параметрів, які потребують інформації із ВАХ таких як: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, струм і напруга при максимальній потужності, нахил ВАХ на перетину осей. Відповідно правильність вибору цих параметрів сильно впливає на результат.

В області досліджень СЕ останнім часом, для оцінки величини параметрів, використовується генетичні алгоритми, насамперед завдяки своїй ефективності і гнучкості. Але мають вони і недоліки, наприклад, деградація ефективності роботи, в основному, спостерігається при сильно втілених цільових функціях, тобто, коли параметри оптимізації сильно взаємозв'язані, а також можлива зупинка алгоритму на локальних мінімумах та інші недоліки.

Наприклад, метод диференційної еволюції [7] використовує всі точки ВАХ, тому незначне відхилення декількох з них не призведе до суттєвих змін

результатів. Але результат сильно залежить від початкових значень із параметрів, таких як: кількість ітерацій і критерій толерантності.

Останнім часом набуває популярності новий перспективний метод навчально-методичної базової оптимізації (Teaching learning based optimization, TLBO) [8]. Є деякі особливості цього алгоритму, що робить його дуже ефективним. Цей алгоритм містить кілька змінних таких як: кількість значень параметрів і кількість ітерацій, для досягнення глобального оптимального рішення. Він дозволяє визначити всі п'ять параметрів CE з одної ВАХ при освітленні. Розглянемо його трохи детальніше.

Алгоритм TLBO використовує концепцію навчально-методичних процесів у класі. Учень класу вважається набір певних значень параметрів, які необхідно визначити. Так, для апроксимації згідно з формулою (1.4), учнем буде набір (вектор) значень $X=(I_{01}, \dots, R_s)$. Сукупність таких наборів (учнів) утворюють клас; однією з характеристик класу є кількість учнів p . Основне завдання навчального процесу – передача знань учням, тобто набуття параметрами значень, максимально придатних для апроксимації. Знання учня оцінюються за допомогою апроксимуючої функції:

$$f(X) = \frac{\left\{ \sum_{k=1}^p [I^{\text{exp}}(U_k) - I^{\text{cal}}(U_k, X)]^2 \right\}}{p} \quad (1.5)$$

де $I^{\text{exp}}(U_k)$ експериментальне значення струму при напрузі U_k , $I^{\text{cal}}(U_k, X)$ розрахункові значення струму по формулі (1.4). Теоретично апроксимуюча функція має бути нулем, тоді параметри CE точні, але на практиці все ж спостерігається її досить мале значення.

Поширення знань складається з двох фаз: а) Фаза Вчитель, б) Фаза Учень.

Фаза Вчитель це перший етап алгоритму TLBO, де початково учні отримують знання від вчителя. Початкові знання (початкові величини параметрів) учнями отримуються випадковим чином. Потім серед всіх учнів вибирається той, у якого знання найкращі (апроксимуюча функція мінімальна). Вчитель «навчає» кожного з учнів, використовуючи співвідношення

$$X_{new,i} = X_i + r(X_{teacher} - (T_f \cdot X_{mean})) \quad (1.6)$$

де X_{new} – вектор нових значень параметрів, X_{mean} – вектор середнього значення знань учнів, r – випадкове число між 0 і 1, T_f – фактор навчання, число, яке змінюється між 1 та 2. Якщо новий набір параметрів приводить до меншого значення апроксимуючої функції, то він замінює старий набір на новий, вважається, що учень отримав нові знання.

Фаза Учень – це розширення знань шляхом взаємодії учнів. Кожен з яких X_i взаємодіє з X_j , якщо X_i кращий за X_j то X_j переміщується в X_i згідно формули (1.7), іншому випадку X_i переміщується у X_j відповідно формулі (1.8).

$$X_{nev} = X_i + r(X_i - X_j) \text{ якщо } f(X_i) > f(X_j), i \neq j \quad (1.7)$$

$$X_{nev} = X_i + r(X_j - X_i) \text{ якщо } f(X_i) < f(X_j), i \neq j \quad (1.8)$$

Продуктивність виділення параметрів оцінюється апроксимуючою функцією в кожній ітерації алгоритму TLBO.

Виконання алгоритму TLBO потребує, в першу чергу, трьох контрольних змінних, а саме: кількість значень параметрів, число ітерацій і діапазон випадкових чисел для окремого параметра. Ці керуючі змінні подаються як вхідні параметри програми.

Таким чином, декілька тисяч ітерацій приводить до якісної апроксимації з якої і отримуємо 7 параметрів ($I_{01}, I_{02}, I_{ph}, n_1, n_2, R_s$ і R_{sh}).

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Зразки

У роботі для досліджень були використані кремнієві р-п структури. Вони складалась із підкладки *Cz-p-Si* легованої бором ($p=1.25 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$) товщиною 300 мкм, на поверхні якого, шляхом імплантації іонів фосфору, створений шар з електронною провідністю ($n=10^{19} \text{см}^{-3}$, товщина ~ 0.5 мкм). Також на поверхнях цього СЕ було сформовані алюмінієві контакти: суцільний на р-області і напівпрозорий на n-області.

Відомо, що, при вирощуванні, дефекти по перерізу кремнієвого злитку розподіляються нерівномірно: так, на периферійних частинах спостерігається підвищена концентрація порушень періодичності кристалічної ґратки. В роботі для досліджень використовувались зразки площею близько 1.5 см^2 , вирізані з різних ділянок пластини СЕ діаметром 100 мм. Так, зразки, що надалі в роботі позначаються SC-4 та SC-8, вирізані з периферійної частини пластини, а SC-11 та SC-12 – з центральної (рис.2.1).

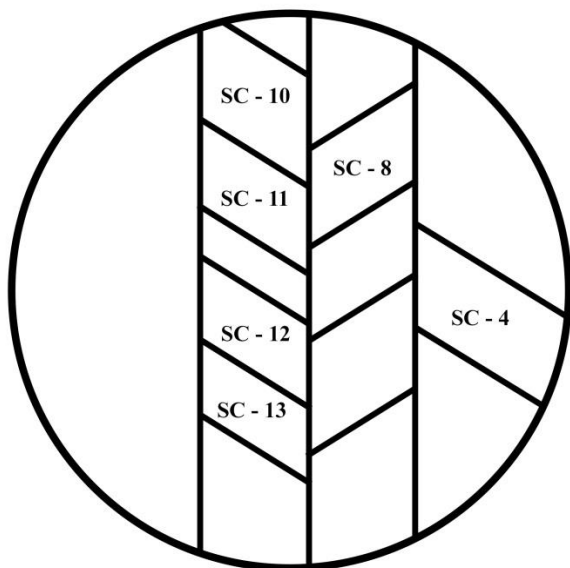


Рис.2.1 Розташування зразків на пластині СЕ.

З метою модифікації дефектної структури СЕ, частина зразків була опромінена γ -квантами ^{60}Co . Поглинута доза D_γ дорівнювала 10^6 рад (зразок SC-8) та 10^7 рад (зразок SC-12).

2.2 Дослідна установка

В роботі проводилося вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) досліджуваних зразків за допомогою експериментальної установки, блок-схема якої зображена на рис. 2.2. Комп'ютеризований блок дозволяє проводити виміри прямої ділянки ВАХ в діапазоні струмів від 10^{-9} до 10^{-2} А.

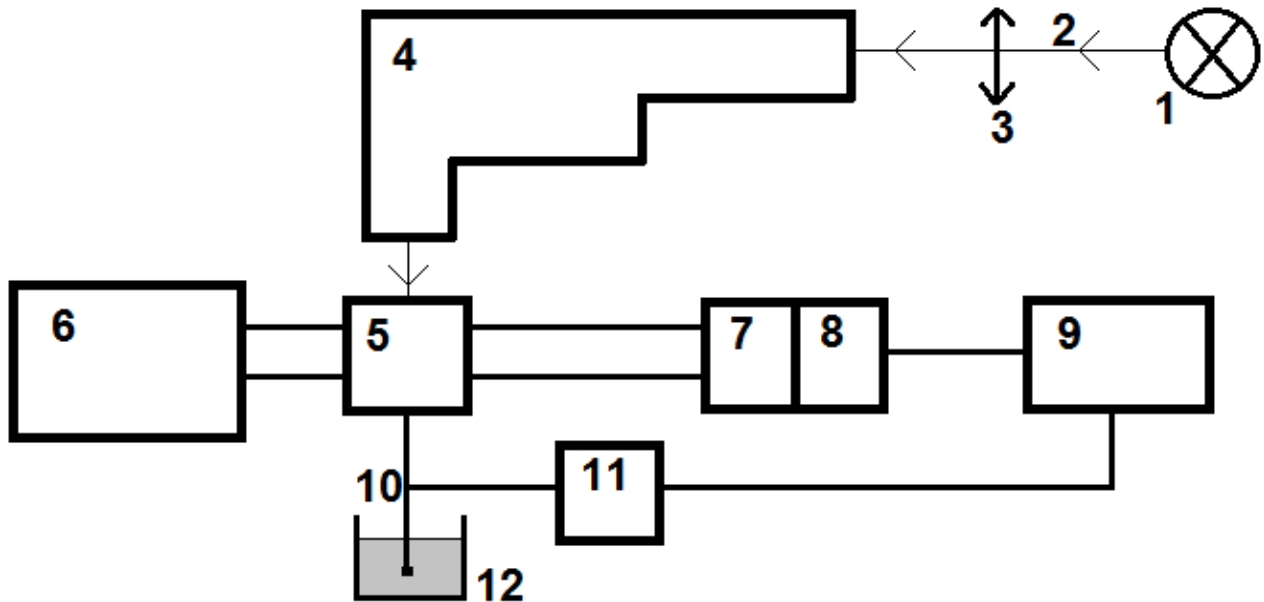


Рис. 2.2 Блок-схема установки: 1 лампа розжарення, 2 світловий промінь, 3 лінза, 4 монохроматор, 5 експериментальна комірка, 6 генератор високих частот, 7 і 8 вольтметр і амперметр, 9 комп'ютер, 10 диференційна термопара, 11 вольтметр (термопари), 12 термос з сумішшю льоду та води.

Вимірювання проводилися як в темряві, так і при монохроматичному освітленні СЕ з боку n-шару. В останньому випадку використовувалися хвилі з довжиною λ , рівною або 600, або 900 нм. Вибір саме таких довжин хвиль зумовлений тим, що в першому випадку ($\lambda=600$ нм) ефективна глибина поглинання світла d_λ у кремнії приблизно 2 мкм, що співрозмірно, як з товщиною n-шару (0,5 мкм), так і товщиною р-n-переходу (0,9 мкм). А отже, в цьому випадку фотогенерація буде відбуватися саме поблизу р-n-переходу. При використанні хвиль з довжиною 900 нм $d_\lambda \approx 25$ мкм і тому в цьому випадку можна враховувати лише генерацію носіїв в глибині р-області, далеко від області просторового заряду.

Для дослідження впливу УЗ на СЕ в зразках проводилось збудження повздовжніх акустичних хвиль – рис. 2.3. Для цього використовувався п'єзоелектричний перетворювач (пластина LiNbO_3). Задля виключення можливості впливу на СЕ п'єзоелектричних полів, перетворювач екранувався та використовувався алюмінієвий хвилевід. Шар діелектрика (слюда) забезпечував електричну розв'язку процесів виміру ВАХ та збудження УЗ. Акустичний контакт створювався за допомогою вакуумного масла. УЗ збуджувався на частоті 5.4 МГц, амплітуда напруги на п'єзоперетворювачі складала 9 В. Для зменшення рівня зовнішніх перешкод вся експериментальна комірка розміщувалася у металевому контейнері.

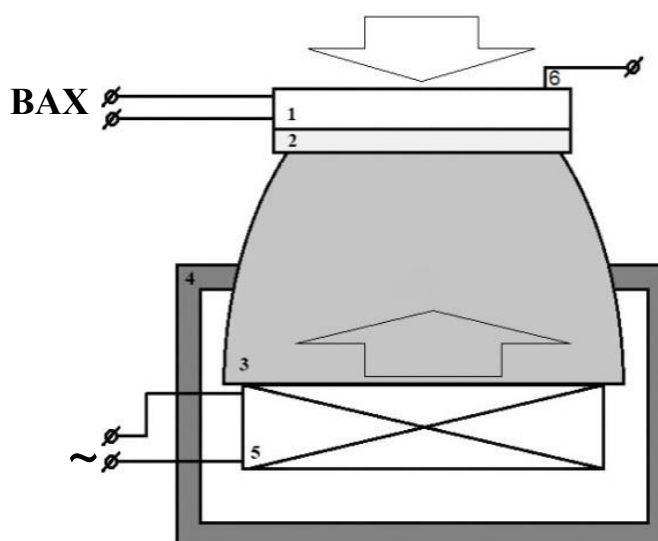


Рис. 2.3.Схема експериментальної комірки: 1 СЕ, 2 діелектрик (слюда), 3 хвилевод, 4 екран, 5 п'єзоперетворювач, 6 спай термопар.

Дослідження проводилися при кімнатній температурі. Температура зразка контролювалась диференційною термопарою.

2.3 Метод диференційних коефіцієнтів

У представлений роботі для визначення параметрів глибоких рівнів, пов'язаних з дефектами в СЕ, використовувався метод диференційних коефіцієнтів, запропонований у роботі [9]. Цей метод спирається на аналіз ВАХ і, як і інші диференційні методи, дозволяє виявити особливості, які на інтегральних характеристиках виражені слабо.

У роботі показано, що при низькому рівні інжекції в області просторового заряду (ОПЗ) р-п-переходу широкозонного НП диференційний показник нахилу

$$\beta = \frac{eI}{kT} \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

пов'язаний з параметрами дефектів (де e - елементарний заряд, I - струм через р-п - структуру, U - напруга прямого зміщення, T - температура, k_B - постійна

Больцмана). А саме, кількість максимумів на залежності $\frac{\partial \beta}{\partial U} = f(U)$ відповідає кількості різних типів глибоких рівнів (ГР), які ефективно приймають участь у рекомбінації носіїв заряду. При цьому, енергія термічної активації рівнів $E_m = E_c - E_t$, (E_c – енергія, що відповідає дну зони провідності, E_t – енергетичне положення ГР в забороненій зоні) визначається абсцисою відповідного максимуму

$$E_m = \frac{E_g - eU_{oi}}{2} + \delta \quad (2.2)$$

Якщо ГР розташовано вище середини забороненої зони, то $c_p p_1 \ll c_n n_1$ (де c_n і c_p – коефіцієнти захоплення електрона і дірки центром, n_1 та p_1 – концентрації електронів і дірок), то

$$\delta = \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{c_n N_c}{c_p N_v} \right). \quad (2.3)$$

Дана величина (δ), як і коефіцієнти захоплення електрона і дірки (c_n і c_p), як правило, невідомі, N_c і N_v – густина станів біля дна зони провідності і вершини валентної зони. Але відношення коефіцієнтів захоплення можна визначити, вимірюючи температурні залежності прямого струму. З іншого боку, навіть у випадку $c_n/c_p=10$, для кремнію при кімнатних температурах, як показують оцінки, $\delta \approx 0.02$ еВ. Амплітуда кожного максимуму визначається внеском у рекомбінацію того чи іншого дефекту.

Нами була використана наступна процедура. Вимірюєна ВАХ коректувалася з врахуванням паралельного та послідовного опору, після чого

на її основі будувалась залежність $\frac{\partial \beta}{\partial U} = f(U)$, яка потім апроксимувалась

сумою кривих гауса, кількість яких і відповідає кількості різних типів параметрів глибоких рівнів у забороненій зоні НП, які активно беруть участь у рекомбінації носіїв заряду. При цьому енергія термічної активації глибокого рівня $E_c - E_t$ визначається абсцисою відповідного максимуму U_0^i

$$E_c - E_t \approx (E_g - eU_0^i)/2$$

де E_g – ширина забороненої зони, E_c – енергетичне положення дна зони провідності.

РОЗДІЛ 3. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. ВАХ досліджених сонячних елементів

На рис.3.1. наведено виміряні ВАХ зразків, описаних в пункті 2.1 а також результат їх апроксимації.

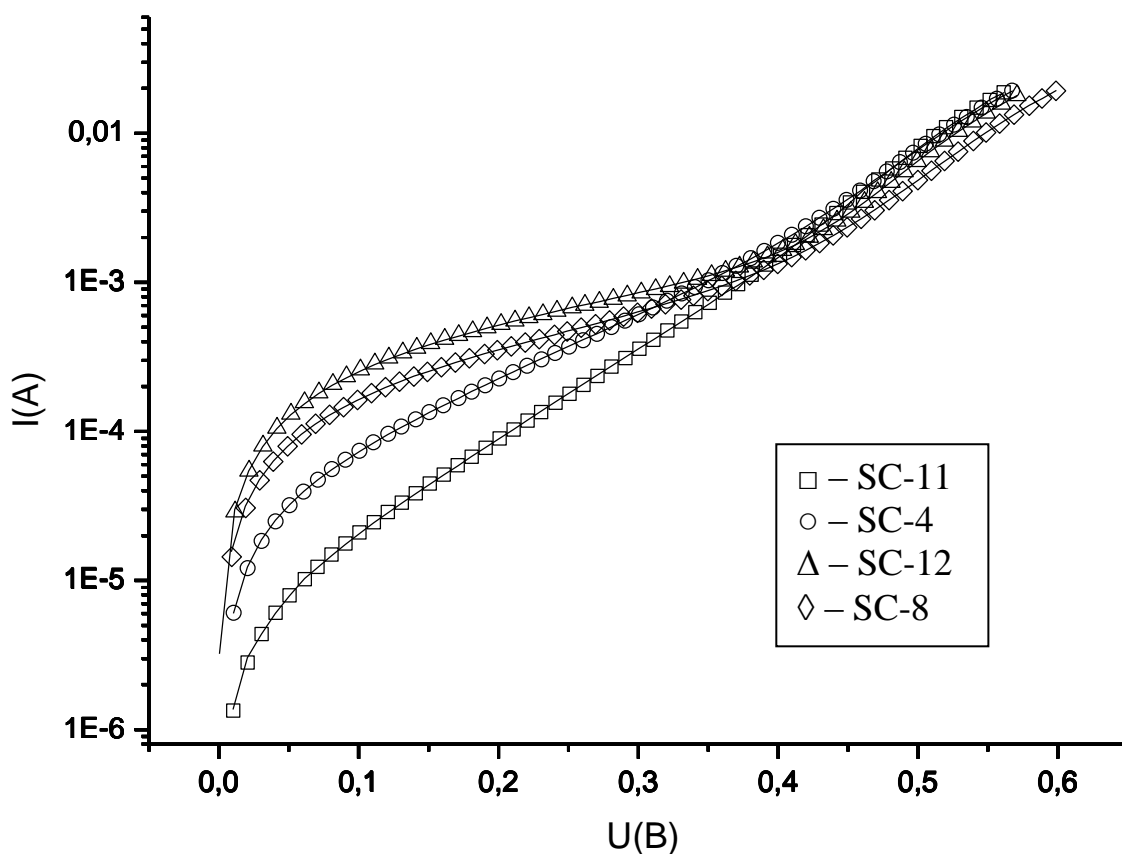


Рис.3.1 ВАХ зразків SC-11 ,SC-4, SC-12, SC-8 без освітлення. Точки – експеримент, лінії – результат апроксимації за формулою (1.4)

З апроксимованих ВАХ у темряві було визначено параметри СЕ представлені у таблиці 3.1. Отримані дані показують, що: 1) для зразків, вирізаних з периферійних ділянок пластини значення n_1 і n_2 збільшуються; 2) при віддалені від центру пластини зменшується величина шунтуючого опору R_s і R_{sh} 3) після γ -опромінення спостерігається зменшення струмів I_{01} , I_{02} і паралельного опору R_{sh} .

Таблиця 3.1 Значення параметрів з темнових ВАХ.

Зразок	T(K)	$I_{01}(A)$	$I_{02}(A)$	n_1	n_2	$R_s(Ohm)$	$R_{sh}(Ohm)$
SC-11	292.8	$4.6 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-12}$	2.7	0.9	3.1	$1.6 \cdot 10^4$
SC-4	289.8	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-9}$	3.8	1.3	2.3	$3.1 \cdot 10^3$
SC-12	291.6	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-11}$	2.2	1	3.2	$3.9 \cdot 10^2$
SC-8	290.5	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$5.9 \cdot 10^{-10}$	2.9	1.3	2.5	$6.3 \cdot 10^2$

Приклади ВАХ, виміряних при монохроматичному освітленні приведені на рис.3.2, а параметри, визначені за допомогою апроксимації, проведеної за методом, описаним у п.2.3 – у табл.3.2.

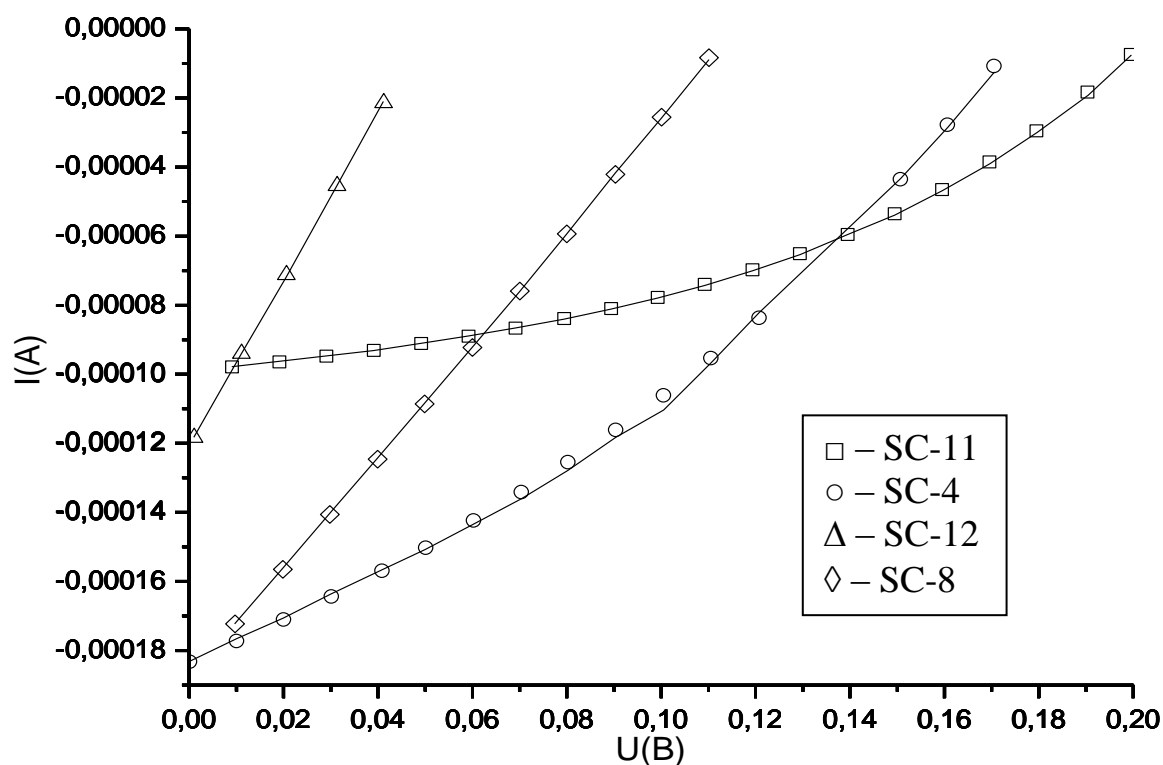


Рис. 3.2 ВАХ освітлених сонячних елементів SC-11, SC-4, SC-12, SC-8. Довжина хвилі освітлення - 900 нм. Точки – експеримент, лінії результат апроксимації.

Необхідно зауважити, що: а) зразок у центрі має більші значення струму короткого замикання і напруги холостого ходу ніж зразок з краю пластини; б) із

збільшенням дози опромінення напруга холостого ходу зменшується, а струм короткого замикання в основному не змінюється.

Таблиця 3.2 Значення параметрів з Освітлених ВАХ.

Освітлення (nm)	900			600		
Зразок	T(K)	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(B)$	T(K)	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(B)$
SC-11	293.3	$3.6 \cdot 10^{-4}$	0.21	292.4	$7.3 \cdot 10^{-6}$	0.05
SC-4	290.4	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0.18	289.1	$1.4 \cdot 10^{-5}$	0.03
SC-12	291.1	$1.8 \cdot 10^{-4}$	0.05	-	-	-
SC-8	290.6	$1.7 \cdot 10^{-4}$	0.11	288.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$	0.01

Отже, з вище наведених даних зауважується, що збільшення концентрації дефектів в результаті віддалення від центру пластини чи збільшення γ -опромінення веде до зменшення паралельного опору, що у свою чергу призводить до зменшення корисної роботи СЕ (струм к.з і напруга х.х).

3.2 Параметри глибоких рівнів у кремнієвих р-п-структурах

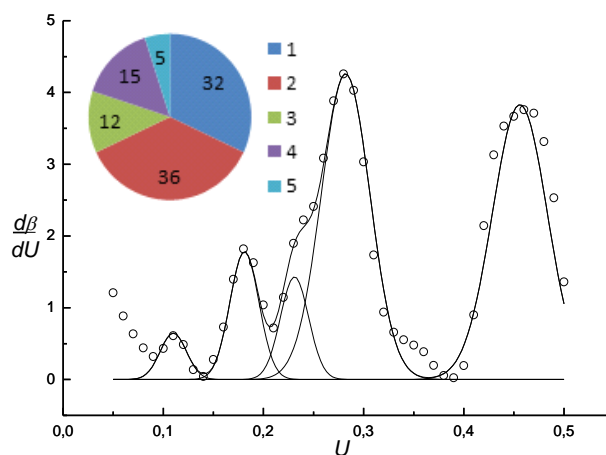
На рис.3.1 наведено отримані залежності показника диференційного опору для зразка SC-11, а в таблиці 3.3 – результати відповідних розрахунків. З наведених даних видно, що в цьому випадку: а) спостерігаються 5 рівнів у забороненій зоні; б) за відсутності освітлення найбільший внесок у сигнал дають дефекти з розташуванням (0.34 і 0.42eВ); в) при освітленні з $\lambda=600$ нм зменшується відносний внесок рівня з енергією 0.47eВ, хоча в цілому, картина змінюється несуттєво; г) при освітленні з довжиною хвилі 900 нм спостерігається суттєве збільшення внеску максимуму, пов'язаного з рівнем $E_c-E_t=0.51$ eВ.

Таблиця 3.3 Енергії глибоких рівнів зразка SC-11.

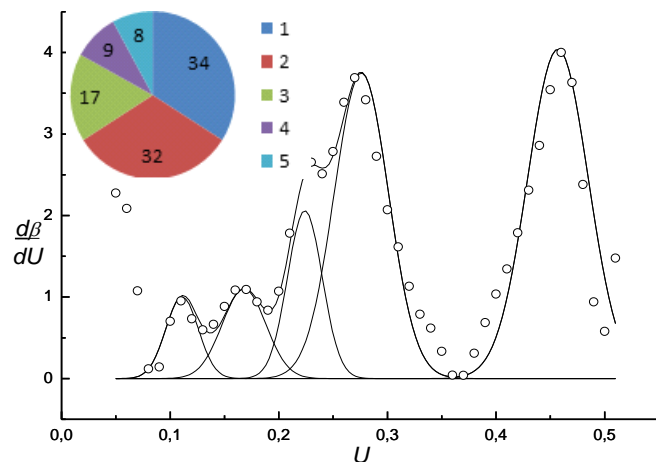
Освітлення, nm	№	Рівень, E_c-E_t , eВ	Висота, %	Рівень, E_c-E_t , eВ	Висота, %
УЗ		-		+	
відсутнє	1	0.34	32	0.33	34
	2	0.42	36	0.42	32
	3	0.45	12	0.45	17

600	4	0.47	15	0.48	9
	5	0.51	5	0.51	8
	1	0.33	39	0.33	52
	2	0.42	37	0.42	41
	3	0.45	14	0.48	2
900	4	0.51	10	0.50	5
	1	0.33	43	0.32	32
	2	0.42	22	0.42	19
	3			0.44	7
	4	0.48	5	0.49	18
	5	0.51	30	0.51	24

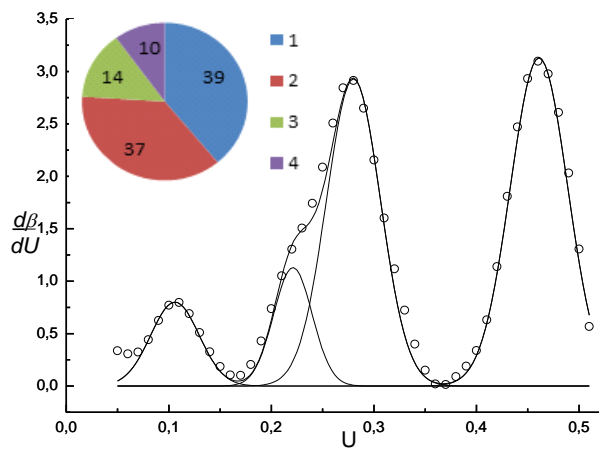
При ультразвуковому навантаженні а) без освітлення зміни в основному не спостерігаються, б) при освітленні $\lambda=600$ нм спостерігається збільшення внеску першого рівня з 39 до 52% і другого з 37 до 41%, в) при освітленні $\lambda=900$ нм з'являється новий рівень $E_c-E_t=0.44$ еВ, хоча з невисоким внеском і зменшення внеску перших двох рівнів (0.33, 0.42 еВ).



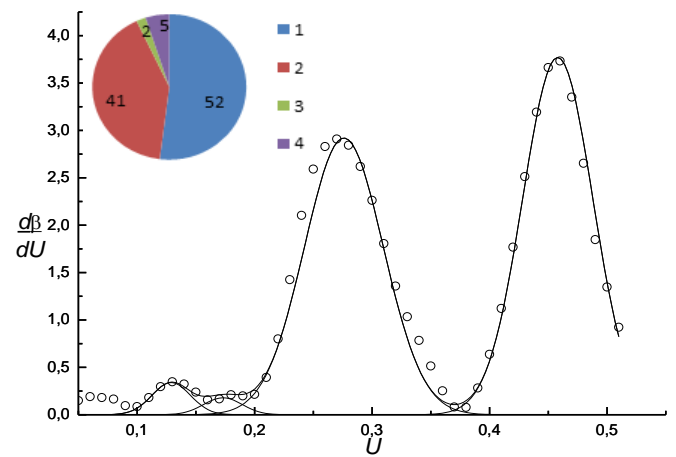
a)



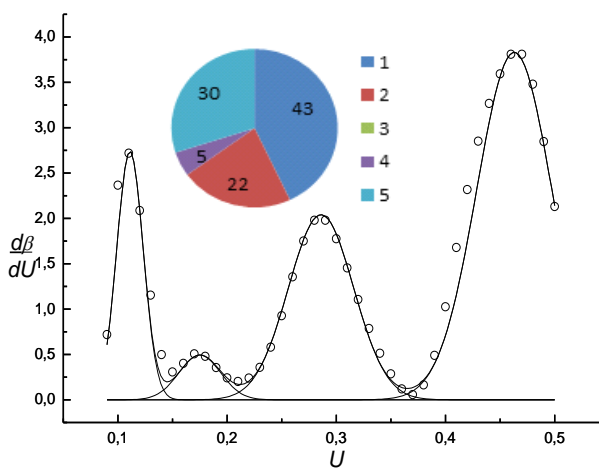
b)



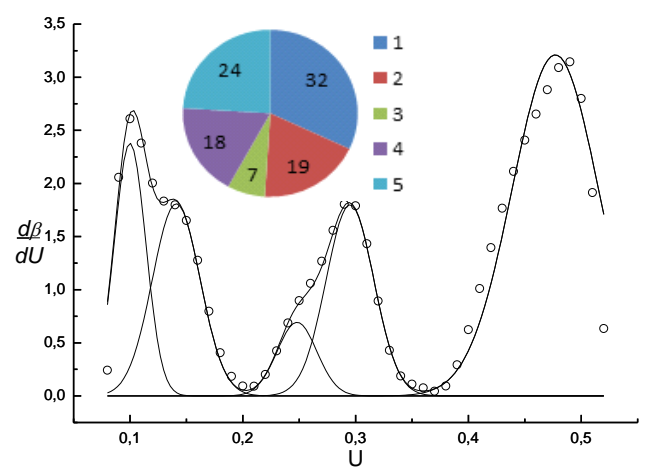
c)



d)



e)



f)

Рис.3.3 Залежність похідної диференційного показника нахилу ВАХ для зразка SC-11 в умовах УЗ навантаження (b,d,f) та без нього (a,c,e). λ , нм : 600 (c,d), 900 (e, f). Точки – експеримент, лінії – апроксимація сімейством гаусіан. На вставці наведено відносні внески кожного максимуму.

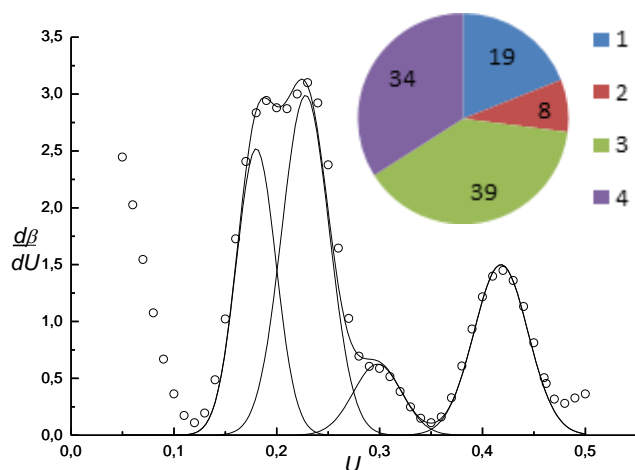
В таблиці 3.4 наведено результати розрахунків по зразку SC-4, з яких видно, що а) спостерігається 4 рівні, на відміну від 5 у SC-11, б) за відсутності освітлення є два основних дефекти з енергіями розташування 0.45 і 0.47 eV, в) при освітленні з $\lambda=600$ нм в основному картина не змінюється, г) при освітленні з $\lambda=900$ нм появляється новий рівень з енергією 0.51eV із внеском 60%.

Таблиця 3.4 Енергії глибоких рівнів зразка SC-4.

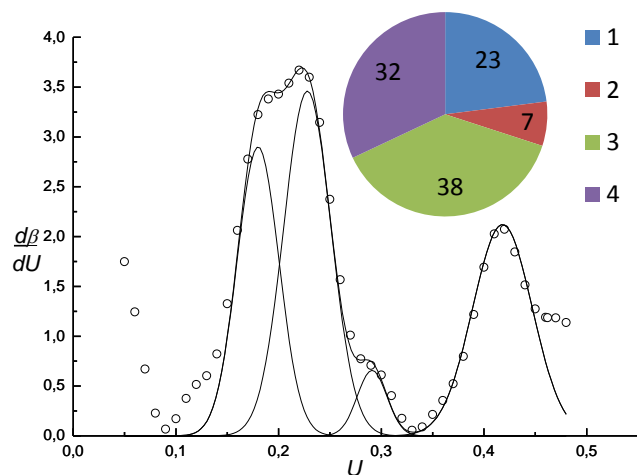
Освітлення, nm	№	Рівень, $E_c - E_t$, eV	Висота, %	Рівень, $E_c - E_t$, eV	Висота, %
УЗ		-		+	
відсутнє	1	0,35	19	0,35	23

	2	0,41	8	0,42	7
	3	0,45	39	0,45	38
	4	0,47	34	0,47	32
	1	0,35	25	0,35	22
600	2	0,41	10	0,41	3
	3	0,45	35	0,45	36
	4	0,47	30	0,47	39
	1	0,35	10	0,36	14
900	2	0,41	7	0,39	5
	3	0,45	13	0,44	17
	4	0,48	10	0,47	14
	5	0,52	60	0,51	50
	1	0,35	10	0,36	14

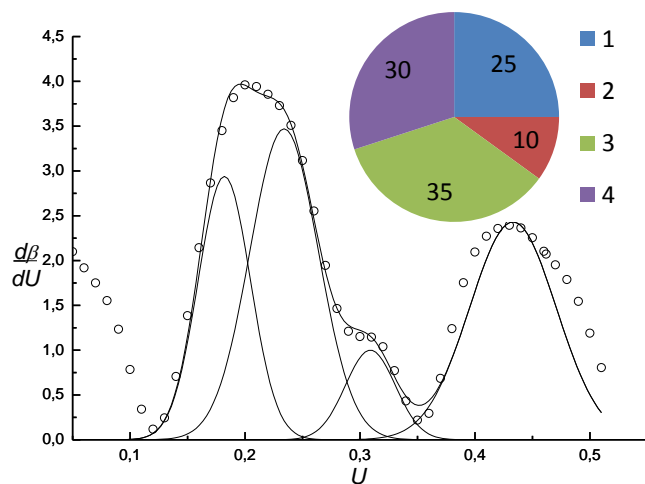
Вплив УЗ навантаження на зразок а) у темряві не спостерігається, б) при освітленні з довжиною хвилі 600 нм незначне підсилення рівня з енергією 0.47eВ, в) а при освітлені з $\lambda=900$ нм незначне збільшення внесків першого, третього і четвертого рівнів за рахунок зменшення внеску другого і п'ятого.



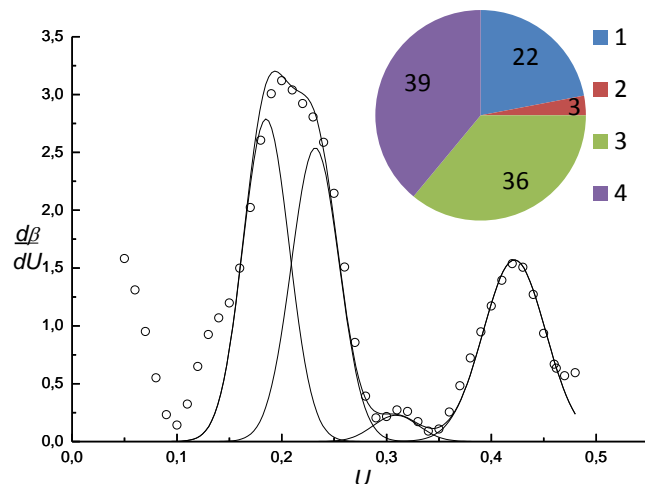
a)



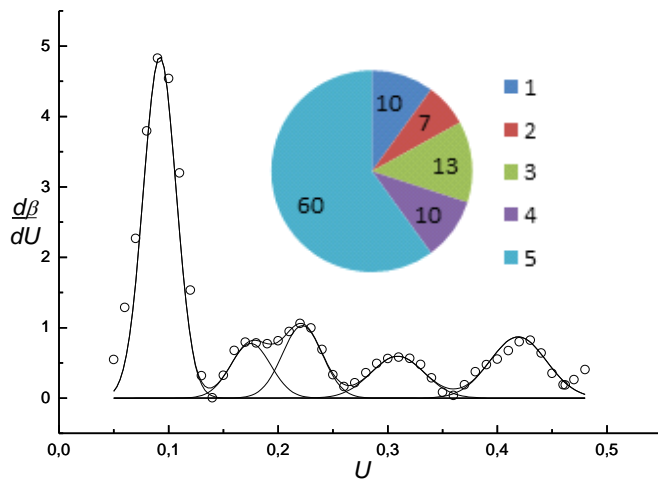
b)



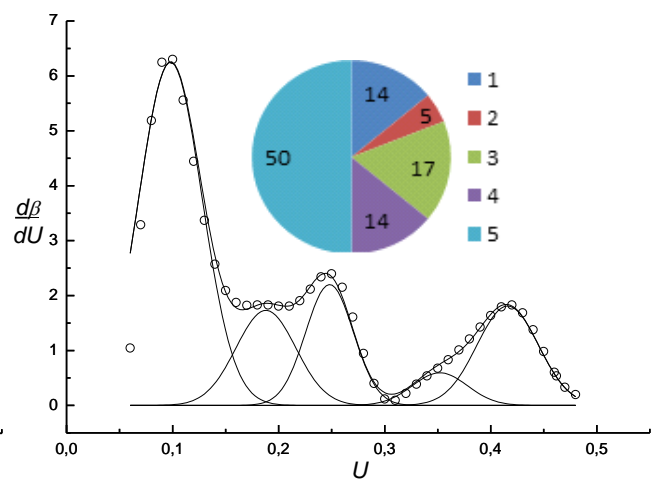
c)



d)



е)



ф)

Рис.3.4 Залежність похідної диференційного показника нахилу ВАХ для зразка SC-4 в умовах УЗ навантаження (b,d,f) та без нього (a,c,e). λ , нм : 600 (c,d), 900 (e, f). Точки – експеримент, лінії – апроксимація сімейством гаусіан. На вставці наведено відносні внески кожного максимуму.

У таблиці 3.5 наведено результати розрахунків по зразку SC-12. Дані з наведеної таблиці результатів свідчать а) спостерігається 5 рівнів у забороненій зоні, б) для зразка без освітлення спостерігається найбільший рівень енергією розташування 0.40eV, в) при освітленні з $\lambda=600$ нм рівні не спостерігаються, г) при освітленні з $\lambda=900$ нм з'являється новий рівень з енергією 0.48eV д) порівняно з не опроміненими зразками вже не так яскраво проявляється рівень 0.51eV.

Таблиця 3.5 Енергії глибоких рівнів зразка SC-12.

Освітлення, nm	№	Рівень, E_c-E_v , eV	Висота, %	Рівень, E_c-E_v , eV	Висота, %
УЗ		-		+	
відсутнє	1	0.32	15	0.32	13
	2	0.40	32	0.40	29
	3	0.44	19	0.44	13
	4	0.50	19	0.50	26
	5	0.53	15	0.53	19
900	1	0.32	16	0.33	12
	2	0.40	33	0.40	27
	3	0.43	9	0.44	18
	4	0.48	22	0.48	23
	5	0.51	20	0.51	20

При УЗ навантаженні а) без освітлення вплив не спостерігається, б) при освітленні з $\lambda=900$ нм зростає внесок третього рівня з енергією 0.43eВ з 9 до 18% за рахунок зменшення внесків першого і другого рівня, в) порівняно з не опроміненими зразками вплив УЗ, а це саме на частоті 900 нм, на опромінені зразки менший і майже не спостерігається.

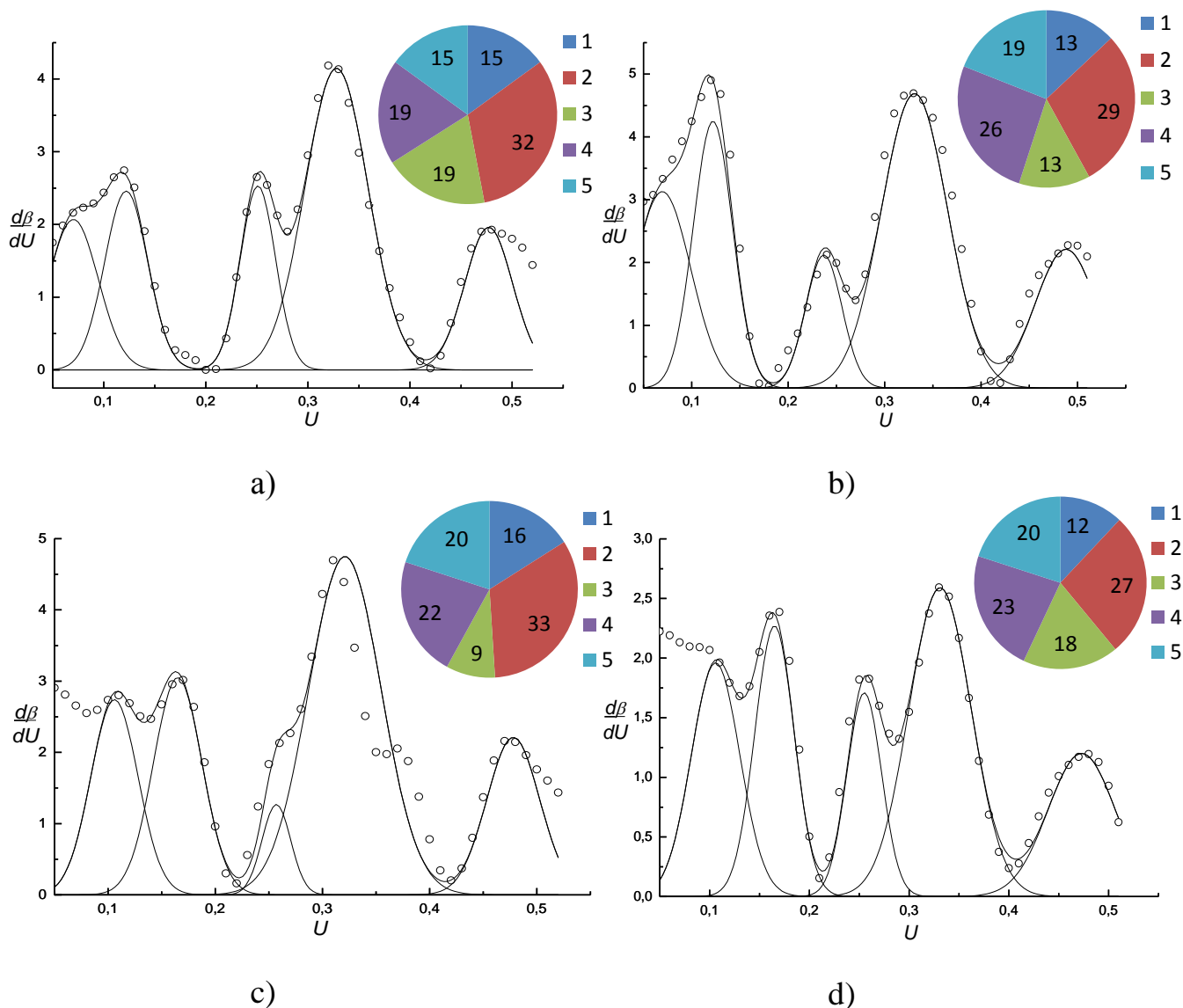


Рис.3.5 Залежність похідної диференційного показника нахилу ВАХ для зразка SC-12 в умовах УЗ навантаження (b,d,f) та без нього (a,c,e). λ , нм : 600 (c,d), 900 (e, f). Точки – експеримент, лінії – апроксимація сімейством гаусіан. На вставці наведено відносні внески кожного максимуму.

У таблиці 3.6 наведені результати розрахунків, з яких видно, що спостерігаються у цьому випадку 6 рівнів у забороненій зоні, б) за відсутності

освітлення найбільший внесок у сигнал дають рівні з енергіями 0.32, 0.41, 0.47 eВ, в) при освітленні з $\lambda=600$ нм зменшується відносний внесок рівня 0.49eВ з 11 до 7% і зникає рівень з енергією 0.43 eВ за рахунок росту другого і третього рівня, г) при освітленні з $\lambda=900$ нм теж не спостерігається рівень з енергією 0.43 eВ, зміна рівня з енергією 0.47eВ на 0.45eВ і порівняно з не опроміненими зразками вже нема явно вираженого рівня з енергією 0.51eВ.

Таблиця 3.6 Енергії глибоких рівнів зразка SC-8.

Освітлення, nm	№	Рівень, E_c-E_t , eВ	Висота, %	Рівень, E_c-E_t , eВ	Висота, %
УЗ		-		+	
відсутнє	1	0.32	18	0.32	18
	2	0.38	10	0.37	3
	3	0.41	19	0.40	24
	4	0.43	16	0.43	21
	5	0.47	26	0.47	30
	6	0.49	11	0.49	4
600	1	0.32	18	0.33	9
	2	0.38	20	0.38	42
	3	0.40	27	0.40	15
	4	0.43	0	0.43	4
	5	0.46	28	0.46	22
	6	0.49	7	0.49	8
900	1	0.32	31	0.32	27
	2	0.39	31	0.39	33
	3	0.45	23	0.45	18
	4	0.48	8	0.48	10
	5	0.51	7	0.52	12

Вплив УЗ навантаження несе а) для зразка у темряві незначне підсилення для третього, четвертого і п'ятого рівнів, б) при освітленні з $\lambda=600$ нм спостерігається суттєве збільшення відносного вкладу другого рівня з 20 до 42%, в) при освітленні довжиною хвилі 900 нм в основному змін не спостерігається, на відміну від не опромінених зразків.

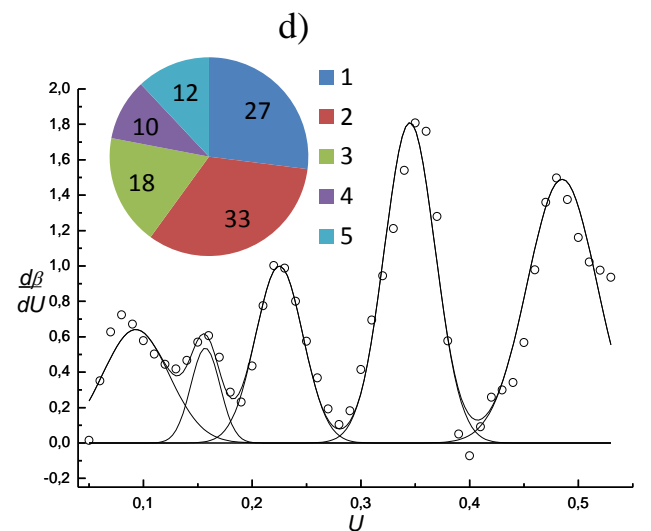
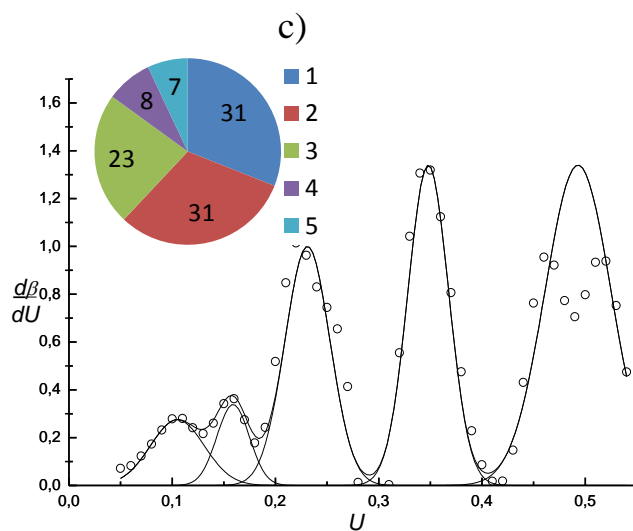
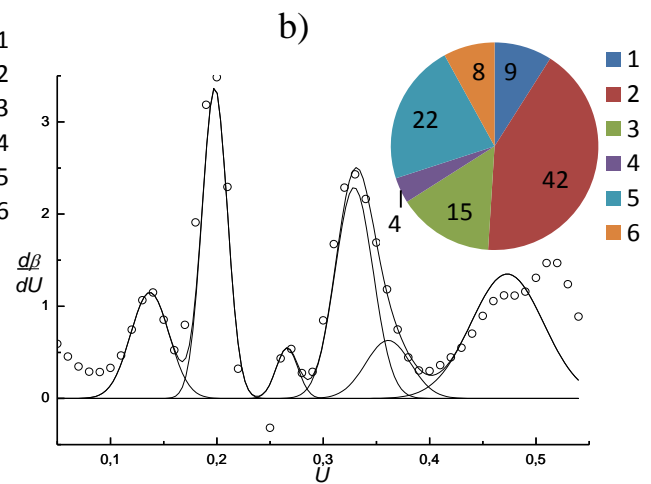
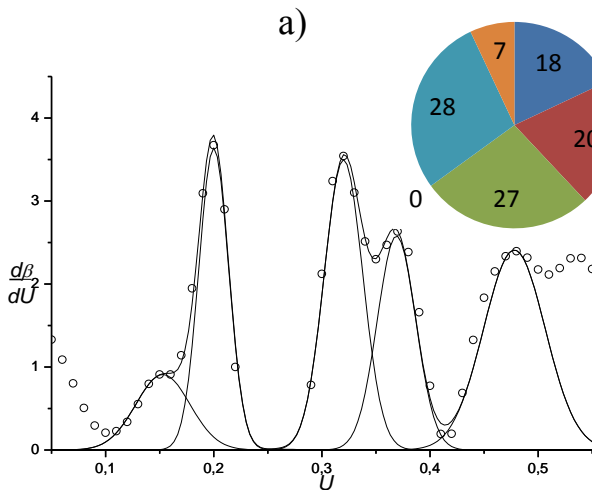
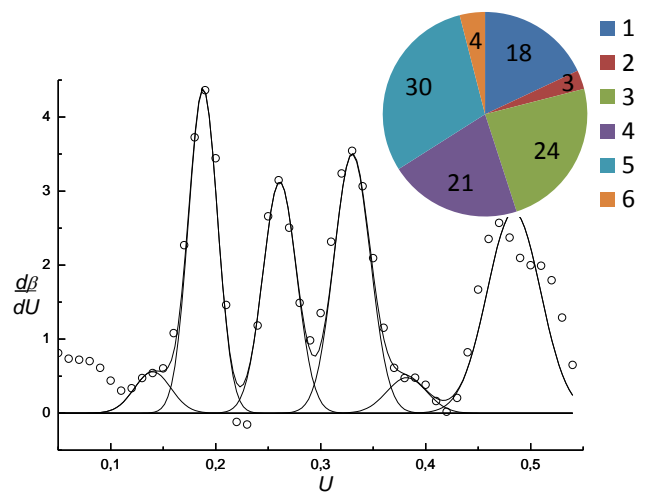
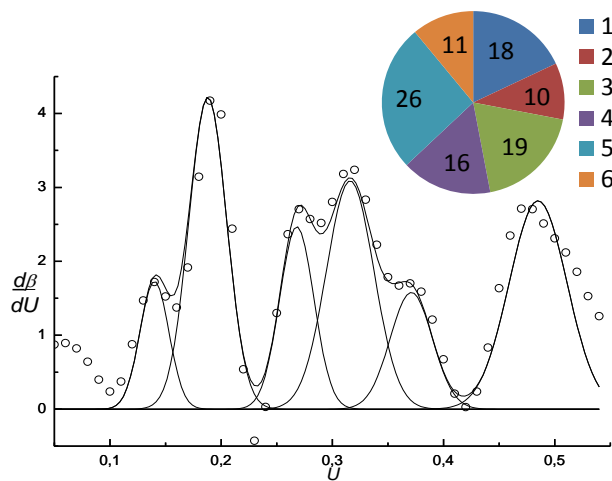


Рис.3.6 Залежність похідної диференційного показника нахилу ВАХ для зразка SC-8 в умовах УЗ навантаження (b,d,f) та без нього (a,c,e). λ , нм : 600 (c,d), 900 (e, f). Точки – експеримент, лінії – апроксимація сімейством гаусіан. На вставці наведено відносні внески кожного максимуму.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведено дослідження дефектної структури кремнієвих сонячних елементів з використанням методу диференційних коефіцієнтів в залежності від а) монохроматичного освітлення б) ступеня γ -опромінення; в) акустичного навантаження.
2. Виявлено, що монохроматичне освітлення з довжиною хвилі 600 нм слабо впливає на структуру рекомбінаційних рівнів кремнієвих сонячних елементів. При використанні освітлення з довжиною хвилі 900 нм в неопромінених структурах суттєво зростає внесок рекомбінаційного рівня з енергією термічної активації 0.51 еВ.
3. В гамма-опромінених структурах виявлено нові рекомбінаційні центри з енергіями активації 0.32 та 0.43 еВ. Також показано, що в опромінених структурах освітлення з довжиною хвилі 900 нм стає причиною значно меншого зростання внеску рівня з енергією 0.51 еВ порівняно з неопроміненими зразками.
4. Ультразвукове навантаження не призводить до кардинальних змін у структурі рекомбінаційних рівнів і може бути причиною лише незначного збільшення внеску у рекомбінацію рівня з енергією 0.34 еВ і зменшення внеску рівня 0.51 еВ. В опромінених структурах вплив УЗ не спостерігається, що свідчить про те, що утворені радіаційні дефекти не є акустоактивними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов/ М. М. Колтун. – Москва: Наука, 1985 – 26-27 с.
2. Коротченков О. А. Об идентификации точечных дефектов вблизи границы раздела полупроводников посредством возмущения акустической волной // Университет им. Тараса Шевченко, том 30, №7, С. 1274-1278.
3. Ostrovskii V. Acoustically driven optical phenomena in bulk and low-dimensional semiconductors/ Ostrovskii V., Korotchenkov A., Olikh Ya., Podolyan A., Chupryna G., Torres-Cisneros M.// Journal of optics a: pure and applied optics. –2001 .– 3. – P. S82–S86.
4. Кулакова Л.А. Акустоэлектронное взаимодействие в квантовых лазерных гетеро структурах /Кулакова Л.А., Аверкиев Н.С., Лютецкий А.В., Горелов В.А.//Физика и техника полупроводников.– 2013. – том 47. – вып. 1. –С. 137-142.
5. Кулакова Л.А. Градиентное управление направлением излучения InGaAsP/InP гетеролазеров / Кулакова Л.А., Лютецкий А.В., Волошинов В.Б. // Письма в ЖТФ. – 2010. – том 36. – вып. 12. – С. 48-54.
6. Благовещенский В.В. Исследование воздействия ультразвука на деформацию кристаллических материалов / Благовещенский В.В., Панин И.Г. // Физика твердого тела. Кострома. Костромской государственный технологический университет. – 2011. – том 53. – вып. 10. – С. 2005-2009.
7. Kaier Wang Parameter determination of Schottky-barrier diode model using differential evolution / Kaier Wang, Meiyang Ye // Solid-State Electronics. – 2009. – 53. –P. 234-240.
8. Sanjaykumar J. Patel Extraction of solar cell parameters from a single current–voltage characteristic using teaching learning based optimization algorithm / Sanjaykumar J. Patel, Ashish K. Panchal, VipulKheraj // AppliedEnergy. – 2014. –119. –P. 384–393.
9. Булярський С.В. Определение параметров глубоких уровней по дифференциальным коэффициентам вольт-амперных характеристик /

Булярський С.В., Вороб'єв М.О., Грушко Н.С. // Лакалін Письма в ЖТФ.
–1999. – том 25. – вып. 5, 12 марта. – С. 22-27.