МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Вплив перебудови комплексу залізо-бор на фотоелектричні параметри кремнієвих сонячних елементів**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма**: Фізика

**Спеціалізація**: Фізика наноструктур в металах та кераміках

**Кваліфікаційна робота бакалавра**

Костини Артема Романовича

**Науковий керівник**:

д. ф.-м. н., доцент

Оліх Олег Ярославович

Робота заслухана на засіданні кафедризагальної фізики

та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № від 2021р.

Завідувач кафедри проф.Боровий М.О.

Київ – 2021

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ виконав та захистив кваліфікаційнуроботу бакалавра з оцінкою \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2021 р.

**АНОТАЦІЯ**

**КостинаА.Р.**Вплив перебудови комплексу залізо-бор на фотоелектричні параметри кремнієвих сонячних елементів.

Кваліфікаційна робота бакалавра за напрямом підготовкиФізика, спеціалізація «Фізика наноструктур в металах та кераміках». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ – 2021.

**Науковий керівник**: д. ф.-м. н., доц. Оліх О.Я., доц. каф. загальної фізики.

Текст ТекстТекстТекстТекстТекст

**Ключові слова**: сонячний елемент, кремній, пара FeB, вольт-амперна характеристика

**SUMMARY**

KostynaA.R**.**Influenceofiron-boroncomplexrebuildingonphotoelectricparametersofsiliconsolarcells

BachelorqualificationworkinthedirectionPhysics, specialization «Physicsofnanostrucruresinmetalsandceramics». – TarasShevchenkoNationalUniversityofKyiv, FacultyofPhysics, DepartmentofGeneralPhysics. – Kyiv – 2021.

**Researchsupervisor**: Dr. OfPhysicsandMathematics, as.prof. OlikhO.Y., as.prof. OfDepartmentofGeneralPhysics.

TextTextTextTextTextTextText

**Keywords**: solarcell, silicon, FeBpair, current-voltagecharacteristic

**ЗМІСТ**

ВСТУП……………………………………………………………………………….2

РОЗДІЛ 1. Основні властивості дефектів, пов’язаних із залізом у кремнії (Огляд літератури)……………………………………………………………………..….....4

1.1 Дослідження пар FeB……………………………………………...……..4

1.2Електричні, оптичні та рекомбінаційні властивості FeB пари.…..……8

1.3 Рівноважна енергія зв’язку пар FeB……………………………………10

1.4Дисоціація пар FeB………………………………………………………11

1.5FeB спарювання: аналіз…………………………………………………12

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ……………………………………..13

2.1 Зразки…………………………………………………………………….13

2.2 Експериментальна установка………………………………………….13

РОЗДІЛ 3. OТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ…………………………………………...17

3.1 Механізм світлоіндукованих змін...………………………………….17

3.2 Температурні залежності параметрів СЕ……………………………21

3.3 Вплив розпаду пар FeB на параметри СЕ…….

ВИСНОВКИ………………………………………………………………………...33

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ……………………………………...34

Вступ

Обмеженість світових ресурсів, енергозалежність і загроза глобального потепління дозволили зрозуміти важливість розвитку відновлюваної енергетики. Найбільш розвиненими галузями відновлюваної енергетики на сьогодні є сонячна і вітрова енергетика. Енергія сонця – найпотужніше екологічно чисте джерело енергії, і що найголовніше – практично безкоштовне. Її можна використовувати в різних цілях, починаючи від забезпечення енергією окремих будинків, закінчуючи космічними кораблями. Серед переваг сонячної електроенергії в першу чергу можна виділити той факт, що такі системи протягом усього терміну експлуатації генерують значно більше енергії, ніж було витрачено при їх виробництві. Кремнієві сонячні батареї, що працюють в таких сонячних країнах як Іспанія, повертають енергію, витрачену на їх виробництво, протягом перших 2-х років, а служать – не менше 20 років. Наступною перевагою є постійне зниження вартості сонячної електроенергії. Крім того, масове виробництво сонячної електроенергії не вимагає використання корисних і часто дорогих земель, так як батареї можуть монтуватися на дахах або фасадах існуючих будівель і споруд, захисних загородженнях автобанів.

На сьогодні найбільш широко використовуються кристалічні фотоелектричні перетворювачі, виготовлені з моно- або полікристалічного кремнія, а також тонкоплівкові сонячні елементи на основі таких матеріалів, як аморфний кремній, телурид кадмію, арсенід галію, фосфід індію та деяких інших з’єднань. Проте за останніми оцінками ринкова частка кремнієвих кристалічних сонячних елементів складає близько 90%.

В свою чергу, залізо є однією з найбільш розповсюджених повсюдних та шкідливих металевих домішок у кремнії. Наприклад, у структурах металу на ізоляторі (MOS) залізо може випадати в осад на межі розділу Si–SiO2, що стає причиною локального погіршення структури оксиду та збільшення шорсткості поверхні; це може бути причиною передчасного пробою. У збіднених областях MOS пристроїв залізо діє як ефективний центр генерації неосновних носіїв , збільшуючи темновий струм та викликаючи помилки оновлення динамічної оперативної пам'яті в мікросхемах. Центри генерації-рекомбінації, пов'язані з розчиненим залізом та його комплексами, збільшують струми витоку в будь-якомузворотному зміщеному переході, збільшуючи тим самим енергоспоживання та виділення тепла. У кристалічних та полікристалічних фотоелектричних пристроях забруднення залізом призводить до створення рекомбінаційних центрів, які зменшують довжинудифузіїнеосновних носіїв і, отже, ефективність сонячних елементів . Оскільки розміри пристрою продовжують зменшуватися, товихід пристрою стає дедалі більш чутливим до дефектів і домішок. Оскільки надчиста технологія , яка дозволяє зменшити забруднення залізом до рівня нижче 1010 до 1011 см−3, надзвичайно дорога, важливим є розуміння механізмів забруднення залізом та його впливу на параметри кремнієвих пристроях. Саме цьому питання останнім часом приділяється постійна уваги в літературі – див., наприклад, [1.2]. В представленій роботі подібна проблема вирішується шляхом дослідження змін параметрів сонячних елементів внаслідок світло індукованої перебудови залізовмісних комплексів.

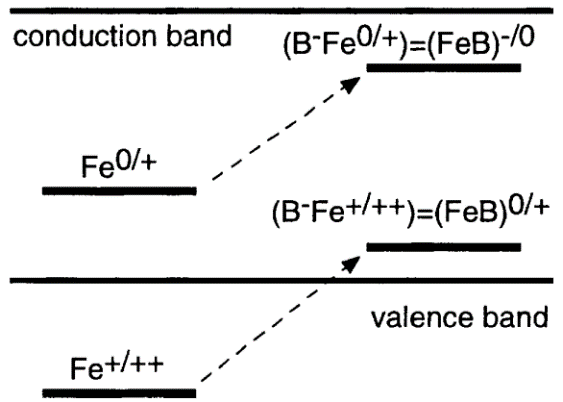
1.Основні властивості дефектів, пов’язаних із залізом у крЕмнії (Огляд ЛІТЕРАТурИ)

**1.1.Дослідження пар FeB**

Можливість створення пари заліза з бором була запропоновано ще в 1957 рCollins і Carlson. Однак вони не виявилиспарювання, оскільки їхні експерименти проводились при температурі занадто високій для значного ступеня сполучення залізо-бор. Докази проутворення пари заліза – бор утворюються,було отримано здослідженьLudwigта Woodbury[3].Вони виявилипарамагнітний резонанс, пов'язаний з(111) орієнтованими парами FeB і припустили, що їх парамагнетизм виникає від трьох неспарених електронів 3d7домішки заліза в кристалічному полі негативного акцептора.Відповідно до їхньої моделі, спінова щільність іонізованого рецептора змінного струму невелика і суттєво не впливає на резонанс пари. Хоча справжній спін пари є S = 3/2 , симетрія резонансу також можебути описаною за допомогою ефективного спіна S = 1/2.Резонанс акцепторного стану пар FeB був виявлений GehlhoffіRehse​​ при постійному освітленні.Вони виявили, щоспектр (111)-осьово симетричний й ідентифікував його як FeBпара від спостережуваного розщеплення лінії внаслідок ізотопів 10B, 11B,та 57Fe.

**1.2.Електричні, оптичні та рекомбінаційні властивості FeBпари**

Ідентифікація рівня енергії (FeB)0 / +приEV + (0,10 ± 0,01) еВ була зробленаFeichtinger [4] здослідження ефекту Холла і підтверджена низкою досліджень ефектуХолла і DLTS різними дослідницькими групами.Graff,Pieper і Kimerlingпідтвердилиідентифікацію цього рівня як рівня заліза-боршляхом моніторингу кінетики дисоціації та асоціаціїпар. GraffandPieper [5] також показали за допомогою спектроскопії поглинання інфрачервоного випромінювання, що сума концентраційрівнів при EV +0,38 еВ та EV + 0,1 еВ залишається постійною під час реакцій асоціації / дисоціації, і щоконцентрація неспареного заміщуючого бору зменшується під час реакції асоціації і відновлюється протягомдисоціації. Кореляція між концентраціями Feiі FeB підтверджено дослідженнями Weber [6].Зниження концентрації бору і рівне збільшення концентраціїзаліза у паріFeB спостерігалось також удослідженні ефекту Холла [7]. Донорна природа пар FeB була визначена на основі порівняння даних питомого опору та ефекту Холла до і після реакції сполучення.Поперечний переріз захоплення отворів пар FeB було зафіксовано як σp =1,5×10−13 см2 при T = 55 K [8], іσp = 2×10−14 см2, виміряне за допомогою DLTS між 50 Kта 65 K [9]. Було виявлено, переріз захоплення дірок парами FeB не є термо активованим [9]. Zoth і Bergholz [10] повідомили про величину поперечного перерізу захоплення електронів парою FeB при кімнатній температуріσn =4×10−13 см2.Однак ці значення можуть бутидещо неточними, оскільки вони не враховували можливості рекомбінації пар через рівень акцептора.Окрім відомого донорногорівня при EV +0,1 еВ, пара FeB також має акцепторнийрівень у верхній половині забороненої зони.Використовуючи просту іонну модель пари FeB,Feichtinger , Kimerling та Lemkeприсвоїли електричний рівень FeB при EV +0,1 еВ доподвійногодонорного стануFei+/ ++з валентної зони в заборонену зону (Рис.1.1) за допомогою електростатичної взаємодії з розташованим поруч зарядом протилежного знаку (B-S). Підсумовуючи, якщо та сама взаємодія підняла б позиціюрівняміжвузольного заліза Fei0/+ в негативно зарядженій паріFeB за допомогою енергії електростатичної взаємодії Eionic =q2 / (4πεε0r) = 0,52 еВ(де r= 0,235 нм, відстань між найближчими місцями заміщення та інтерстиціалу), то очікувалось, що один акцепторний стан (FeB) – мав би рівеньу верхній половині ширини зазору приблизно EC -0,25 еВ(Рис. 1.1).



**Рис .1.1.** Діаграма енергетичних рівнів міжвузольногозаліза в електричному полі дрібного акцептора

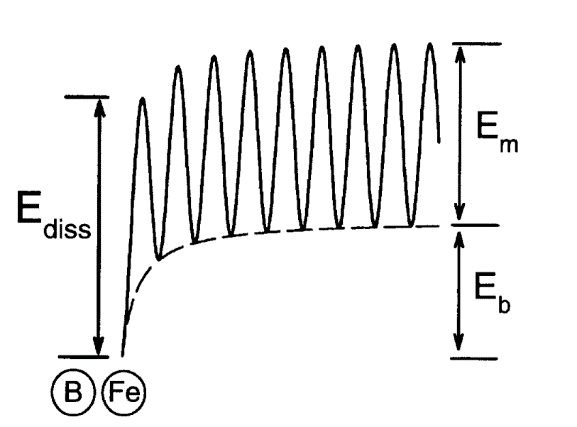
Було виявлено, що це передбачення надзвичайно добре збігаєтьсяз експериментальними висновками Brotherton, EC - 0,29 еВ, Lemke, EC - 0,23 еВ,таNakashima, EC -0,29 еВ, отриманими з використаннямзразків p-типу та методів інжекційної спектроскопії неосновних носіІВ. GehlhoffandRehse ​​оцінили енергетичне положення рівня (FeB)-10 у забороненій зоні при EC - (0,25 ± 0,05) еВзі спостережуваної спектральної залежностіфотоіндукованої зміни EPRсигналу. Як було згадано вище, цей спектр EPR бувідентифікований як той, що стосується пар FeB із спостережуваної лініїрозщеплення завдяки ізотопам 10B, 11B та 57Fe. Ідентифікація рівня при EC -0,29 еВ як (FeB)- підтвердженаз використанням спектроскопії перетворення Фур'є (FTIR) Ghatnekar– Nilsson . Вони виділили чотири різкі лінії в спектр FTIR при 6969,6, 6978,4, 7008,3 та 8291,7 см− 1як поглинання тригональними парами FeB і оцінено зїх експериментальних даних позицій двох рівнів FeBпари при EV +0.11 еВ для (FeB)0 / + та при EC −0.275 еВдля пари (FeB)-/0.Lemke повідомив про поперечні перерізи захоплення (FeB)-10при T = 90 Kσn ≈ 10−15 см2 та σp ≈ 3 × 10−15 см2дляелектронів та дірок відповідно. Waltzповідомив про подібні значення σn ≈ 2,5 × 10−15 см2 і σp ≈3 × 10−14 см2 при кімнатній температурі.Обидва дефекти, міжвузольнапара заліза та FeB, є сильними центрами рекомбінації. Активність рекомбінації пар FeB при низькому рівні ін'єкції приблизно в 10 разів нижча, ніж рівень міжвузольногозаліза.Довжина дифузії неосновнихносіїв, виміряна за допомогою методу поверхневоїфотонапруги (SPV) до (L0) і після(L1) дисоціації пар кількісно пов'язана зконцентрацієюміжвузольного заліза, NFe:

*,* (1.1)

де L0 і L1 вимірюються в мкм. Дещо несподівано із статистики Shockley–Read–Hall (SRH), що рівень пар FeB при EV + 0,1 еВ,будучи настільки дрібним, є сильним центром рекомбінації.

**1.3.Рівноважна енергія зв’язку пар FeB**

Визначимо реакцію утворення та дисоціацію пар FeBза допомогою трьох енергій, схематично представлених на рис.1.2: рівноважна енергія зв’язку Eb, дифузійний бар’єрміжвузольногозаліза Em та енергія дисоціації пар Еdiss.



**Рис .1.2.**Енергетична діаграма взаємодії FeB у кремнії

Енергію рівноважного зв’язку Eb можна отримати заналізу температурної залежності рівноважної часткиFei в парі з бором, яка випливає із закону діючих мас:

де Ni- густинаміжвузловихпозицій у кремнієвій решітці(5 × 1022 см− 3), а Z - кількість можливих орієнтацій пари з однаковою симетрією навколо одного атома акцептора змінного струму (4 для тетраедричної симетрії). Закон визначає співвідношення рівноваги концентрацій пар FeB,N (FeB), до концентрації іонізованого заліза, N (Fei+),а не до загальної концентрації непарного заліза.Залежність рівноважної частки від температурипарного заліза вивчалиKimerling, Lemke, ReissіWunstel.Визначені енергії зв’язку варіюються від 0,45 еВ[11] та0,53 еВ [9] до 0,6 еВ та 0,65 еВ. Wijaranakula [12] розрахував енергію зв’язку 0,58 еВз експериментальних даних, про які раніше повідомляв Nakashima [13].

**1.4.Дисоціація пар FeB**

Кінетика дисоціаціїFeB визначаються потенційним бар'єром Ediss для стрибкаіона Fei від першої позиції найближчого сусіда доатом бору. Константа часу дисоціації визначається:

де ν - частота спроб. Хоча цілкомпросто визначити бар'єр дисоціації Еdiss з температурної залежності реакції дисоціації,нам відомі лише два значення, про які повідомляється в літературі:Ediss = 1,17 еВ (ν = 1,8 × 1010 с−1) [7] та 1,2 еВ(ν = 5 × 1010 с−1).Востаннійроботі Feuchtingerвивчав “міграцію” FeBпар, що чітко складається з дисоціації пари, дифузії заліза на наступний іонізований бор та повторного об'єднанняпар. Таким чином, кінетика реакції визначаєтьсяреакцією дисоціації. Потрібно підкреслити, що не було знайдено жодних ознак того, що процес повторного об'єднанняпари залізо – бор було належним чином враховано під час досліджень дисоціації . Таким чином,не можна виключати, що енергію дисоціації ,можливо ,потрібно буде переоцінити.Ostapenko і Bellповідомили про дисоціаціюпар FeB за допомогою ультразвуку. При 75 ◦C близько 25%пар донор-акцептор можуть бути роз'єднані за допомогою ультразвукового лікування. Було припущено, що ультразвукові вібрації змушують частково розділятисяFei та B.Цезменшує енергію зв'язкуFeB пари і прискорює процес повної дисоціації пари.Також посилюється реакція дисоціації пар FeBін'єкцією неосновних носіїв. Kimerling і Bentonповідомили, що реакція дисоціації може бути посилена на 95%ін'єкцією неосновних носіїв притемпературі вище 77 К. Швидкість дисоціації пар лінійно збільшується із струмом інжекції і слабко залежить від температури при енергії близько 0,1 еВ [14].Про світлостимульовану дисоціацію пар FeB вперше повідомивGraffі зараз цей метод широко використовується в SPVсистемахвизначення довжини дифузії неосновних носіїв [14]. Дисоціацію проводили, фокусуючи світло галогенної лампи потужністю 50 Вт у пляму діаметром діаметр 0,5 см на поверхні пластини [5]. Ін'єкційне стимулювання посилення дисоціаціїпар пояснюється реакцією дефекту, посиленою рекомбінацією [15]. Приклади посиленої рекомбінацією дифузії вкремнії - це посилення дифузії міжвузольногоалюмініюта зменшення бар'єру для міграції заліза з початкової позиції у FeAl, FeIn,і FeB пари до позиціїсусіда. Збільшення швидкості реакції (до 6 порядків) за допомогою світласпостерігалися і в інших системах, таких як GaAs,GaP та GaAs1 − xPx. Weeks [16]припускав, що енергія, що виділяється під час захоплення неосновного носія на дефект і рекомбінації з попередньо захопленим основним носієм повністю перетворюються на коливання дефекту, зменшуючи видиму енергію активації термічного відпалу або дифузії дефекту.

**1.5.FeB спарювання: аналіз**

Важливим фактором, якимчасто нехтують при аналізі реакцій спарювання FeBі дисоціації є те, що швидкість спостережуваних реакційвизначається як швидкістю асоціації rass = τass−1 , так і швидкістю дисоціації rdiss = τdiss−1. У більшості досліджень асоціацію абоенергію дисоціації пар розраховували затемпературною залежністю швидкості реакції, припускаючи, щореакція - це або суто дисоціація, або суто асоціація.Реакція сполучення залізо – бор визначається за допомогою наступного диференціального рівняння:

де N(FeB) - концентрація пар залізо – бор, аN(Fei) - концентрація іонізованого міжвузольногозаліза.Розв'язок цього рівняння задається в загальному випадку формулою:

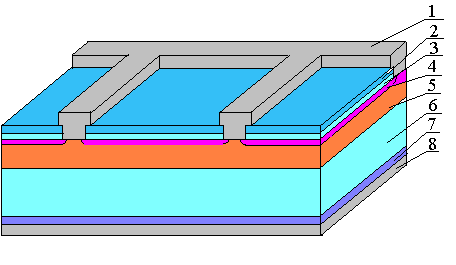
, (1.5)

де N0 (FeB) - початкова концентрація пар FeB (при t = 0). Важливо, щобшвидкість реакції завжди задавалась сумою асоціації татемпом дисоціації. Таким чином, температурна залежністьшвидкості реакції не обов'язково визначається лише енергією дисоціації або лише дифузійним бар'єром. Явна енергія активації реакції, як повідомляється в літературі ,насправді може бути між справжньою дисоціацією тадифузійними бар'єрами. У цьому випадку видима енергія залежала б від рівня легування зразків та температурного діапазону, що використовується в дослідженнях. Повний опис кінетики реакції повинен включати температурну залежністьіонізованої частини заліза[17] і швидкість випадіння (агломерації) заліза.

**РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ**

**2.1 Зразки**

У роботі для досліджень було використано зразки кремнієвих сонячних елементів(СЕ) дифузійно-польового типу, що мають структуру *n+-p-p+*. Виготовлені вони були на основі монокристалічних пластин*p*-типу кремнію товщиною 380 мкммарки КДБ-10(кремній дірковий легований бором з питомим опором 10Ом⋅см), концентрація вільних носіїв в якому складала близько 1.36⋅1015 см-3. Пластини вирізані зі злитків, вирощених за методом Чохральського. p-n перехід було створено шляхом дифузії фосфору при температурі 940°С. Товщина n+-шару складала 0,7 мкм, його поверхневий опір 20-30 Ом/. Антирекомбінаційний ізотопний перехід на тиловій поверхні створено за допомогою p+ шару, який сформовано дифузією бору при температурі 985°С. Товщина цього шару та поверхневий опір – 0,6 мкм та 10-20 Ом/ відповідно. На фронтальній поверхні СЕ були наявні також просвітлюючі покриття з двоокису кремнію SiO2товщиною 30 нм і нітриду кремнію Si3N4 товщиною 40 нм. Також на поверхнях СЕ було сформовані алюмінієві контакти: суцільний на тиловійі та гребінчастий на фронтальній. Схема структури представлена на Рис.2.1.



|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.1. Схема структур досліджених сонячних елементів. 1 –фронтальнийметалевий електрод (Al); 2 –шар нітриду кремнію; 3 –діелектричний шар SiO2; 4 –індукований *n*++-шар; 5 – дифузійний *n*+- шар;6 –базова область (*р*-Si); 7 – дифузійний *р*+-шар; 8 –тилова металізація (Al) |

В експериментах використовувалися зразки розміром 1,5×1,5 см2.

**2.2 Експериментальна установка**

В роботі проводилося вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) досліджуваних зразків за допомогою експериментальної установки, блок-схема якої зображена на рис. 2.2.Досліджуваний сонячний елемент (DUT, deviceundertesting) розміщувався в термостаті. Регулятор температури термостату побудовано з використанням елементів Пельт’є, які живляться від керованого за SPI-протоколом джерела струму D30-06. Вимірювання температури DUT відбувається за допомогою цифрового датчика STS-21. Датчик підтримує І2С інтерфейс. Керування температурою термостату здійснюється з використанням програмно реалізованого пропорційно-інтегрально-диференційного контролера, що дозволяє підтримувати необхідну температуру зразка в діапазоні 280÷360 К з точність до 0,05 К.

|  |
| --- |
| 5  7  3  4  2  8  1  6 |
| Рисунок 2.2 – Схема експериментального установки. 1 – DUT, 2 – термостат, 3 – блок вимірювання ВАХ, 4 – джерело світла малої інтенсивності, 5 – джерело світла високої інтенсивності, 6 – світловод, 7 – комутатор сигналів, 8 – персональний комп’ютер |

Блок вимірювання вольт-амперних побудовано з використанням схеми зворотного зв’язку, яка дозволяла компенсувати падіння напруги на вимірювачі струму.У якості джерела напруги використовувався блок на основі 16-розрядного цифро-аналоговоперетворювача AD5752R, керованого по протоколу SPI. Для вимірювання струму використовувався мультиметр В7-21А, для вимірювання напруги – вольтметр В7-21. Для пристроїв серії В7-21 організовано автоматичне зчитування показань з використанням інтерфейсу SPI.

Як видно з рис.2.2, вустановці використовується два джерела світла. Одне, низькоінтенсине, призначене для оцінки ефективності фотоелектричного перетворення шляхом вимірювання ВАХ під час освітлення. У якості джерела вибрано світловипромінюючий діод SN-HPIR940nm-1W. Максимум випромінювальної здатності цього діоду припадає на інфрачервоний діапазон (940 нм). В цьому випадку ефективна глибина поглинання світла *d*λ у кремнії приблизно25 мкмі тому можна враховувати лише генерацію носіїв в глибині р-області, далеко від області просторового заряду.

У зв’язку з необхідністю вимірювання вольт-амперних характеристик протягом тривалих інтервалів часу (порядку десятка годин, що відповідає характерним часам перебудови пар залізо-бор у кремнієвих сонячних елементах при кімнатній температурі) особлива увага була приділена забезпеченню стабільності освітлення. Відомо, що інтенсивність випромінювання LED (lightemissiondiod) у першу чергу визначається температурою та струмом, що проходить через нього. Задля забезпечення сталості температури використовувалася система резистивного нагріву джерела світла на основі термостату W1209. Для стабілізації струму живлення була застосована схема, зображена на рис.2.3. Як наслідок, вдалося досягти а) постійності струму через світловипромінюючий діод з точністю до 0,5%; б) можливості формування необхідної часової залежності інтенсивності випромінювання шляхом зміни сигналу цифро-аналогового перетворювача. У якості останнього була використана плата ЕТ1255.

|  |
| --- |
| 1  2  3  4  5 |
| Рис. 2.3. Схема живлення джереласвітланизькоїінтенсивності. 1 – LED (SN-HPIR940nm-1W), 2 – блок стабілізаціїтемператури, 3 – блок стабілізації струму живлення, 4 – живленнядіоду (12 В), 5 – сигнал з цифро-аналогового перетворювача. |

Друге джерело світла, високо інтенсивне, призначене для дисоціації дефектних комплексів, пов’язаних з залізом. З літератури [18,19] відомо, що подібний результат може бути досягнутий з використанням галогенових джерел світла. У роботі випромінюючим елементом є галогенова лампа потужністю 200 Вт.

У зв’язку з необхідністю швидких змін джерела освітлення сонячного елементу (низькоінтенсивне з використанням SN-HPIR940nm-1Wдля вимірювання світлових вольт-амперних характеристик та високоінтенсивне, на основі галогенової лампи) був розроблений спеціальний блок з використанням оптоволоконного світловоду.

Комутуючий блок, в якому реалізована підтримка різноманітних інтерфейсів розроблено з використанням мікроконтролерної плати Arduino Mega 2560. Персональний комп’ютер використовується для керування різноманітними елементами стенду та для збереження результатів вимірювань.

РОЗДІЛ 3. OТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Механізм світлоіндукованих змін

У даній роботі проводилося дослідження змін параметрів кремнієвих сонячних елементів (СЕ) після інтенсивного (за допомогою галогенової лампи) освітлення. Фотоелектричні властивості СЕ багато в чому визначаються часом життя неосновних носіїв заряду τ. В свою чергу, для Cz-Si:B цей час суттєво залежить від наявності таких дефектів, комплекси, що містять бор та кисень (ВО-дефекти), пар залізо-бор та кисневмісних преципітатів. Перші два типи дефектів можуть змінювати свій стан під дією інтенсивного освітлення і тому першочерговою задачею було визначити причини спостережуваних ефектів.

Час життя неосновних носіїв, пов’язаний з рекомбінацією на дефектах в базі СЕ, τSRH описується в рамках моделі Шоклі-Ріда-Хола:

, (3.1)

де *NA* – рівень легування р-області, *n*0 – рівноважна концентрація неосновних носіїв в базі СЕ, Δ*n* – концентрація нерівноважних носіїв,

, , (3.2)

*Ε*d – енергетичне положення рівня, пов’язаного з дефектом, Nc та Nv - ефективні густини станів поблизу дна зони провідності та вершини валентної зони, відповідно; Ес та Ev – енергетичні положення країв дозволених зон;

,  , (3.3)

Nd – концентрація дефектів, νth,n та νth,р - теплові швидкості електронів та дірок, відповідно, σ*n* та σ*p* – поперечні перерізи захоплення електронів та дірок.

Перебудова ВО-дефектів в умовах освітлення (так звана LID, lightinduceddegradation, світлоіндукована деградація) викликає зменшення часу життя, причому ці зміни є залишковими при температурах поблизу кімнатних: для відновлення початкових значень τ необхідним є відпал при температурах не нижче 200°С [20].

При освітленні також може відбуватися розпад пар FeB, причому зміни часу життя пов’язані з суттєвими різницями енергетичних положень рівнів та поперечних перерізів захоплення носіїв міжвузольним залізом та парою. Так, згідно з даними [21],

для Fei: *E*d = *E*V+0,394 еВ;

 (м2);  (м2);

для FeB*E*d = *E*C-0,26 еВ;

 (м2);  (м2).

Як показано в літературі [22], розпад пар може викликати як зменшення, так і зростання τ: це залежить від концентрації нерівноважних носіїв заряду, і коли це величина не перевищує певне критичне значення Δncr, спостерігається зменшення часу життя. В свою чергу, Δncr залежить від рівня легування і для КДБ10 має становити величину близько 2⋅1014 см-3.

Концентрацію нерівноважних носіїв заряду можна оцінити за величиною напруги холостого ходу [23]

 , (3.4)

де ni – концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику. Використовуючи формулу (3.4) були проведені розрахунки очікуваної концентрації надлишкових носіїв при різних значеннях температури та *V*OC, результати яких приведені на Рис.3.1.При розрахунках для опису температурної залежності ni використано вираз з роботи [24]:

, (3.5)

де *E*G – ширина забороненої зони кремнію.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 3.1.** Залежності концентрації нерівноважних носіїв заряду в режимі холостого ходу при різних температурах. |

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 3.2.**Залежність струму короткого замикання до та після інтенсивного освітлення (момент освітлення позначено стрілкою). Температура 340 К. |

В наших дослідженнях (див. далі) напруга холостого ходу не перевищує 0,42 В при 300 К, а отже Δn<1012 см-3<Δncr. Таким чином, відповідно до даних на Рис.3.1, можна очікувати зменшення часу життя неосновних носіїв. На рис.3.2 приведена типова залежність струму короткого замикання сонячного елементу після освітлення галогеновою лампою. Видно, що внаслідок високоінтенсивного освітлення (0,25 Вт/см2) *I*SC зменшується, що свідчить про підсилення рекомбінаційних процесів. Цей процес є оборотнім: величина струму короткого замикання повністю відновлюється після зберігання при температурі близько 70°С протягом 50 хв.

При переважній генерації фотоносіїв у базі сонячного елементу і використанні монохроматичного освітлення величина струму короткого замикання може бути описана виразом

 (3.6)

де  – коефіцієнт поглинання світла, *W*ph – світлова потужність, *R* – коефіцієнт відбиття, β – коефіцієнт квантового виходу, λ – довжина хвилі падаючого світла (в нашому випадку 940 нм), *L* - довжина дифузії неосновних носіїв заряду:

 (3.7)

μ – рухливість носіїв. У припущенні, що суттєву роль в рекомбінації відіграють саме дефекти, пов’язані із залізом, для оцінки τможе бути використаний вираз:

 (3.8)

де τBtB – час життя, пов’язаний з випромінювальною міжзонною рекомбінацією,

 (3.9)

*В* – міжзонний рекомбінаційний коефіцієнт, τAuger – час життя, пов’язаний з Оже-процесами

(3.10)

а рекомбінаційний коефіцієнт описується виразом [25]

, (3.11)

τFei та τFeB пов’язані з рекомбінацією на міжвузольних атомах заліза Fei та на парах FeB і для їхнього обчислення може бути використаний вираз (3.1), τrest описує решту рекомбінаційних каналів, включно з поверхневою рекомбінацією.

Відомо, що після розпаду пар часова залежність концентрації міжвузольних атомів заліза описується виразом [26]

, (3.12)

де *NFe,0*–кількість міжвузольних зразу після інтенсивного освітлення, *NFe,eq* – концентрація міжвузольних атомів заліза в рівновазі (після тривалого перебування у темряві):

 , (3.13)

Для характерного часу асоціації комплексів у літературі запропоновано вираз [27]:

,(3.14)

де *Εm* – енергія міграції міжвузольних атомів заліза. В свою чергу, часова залежність концентрації пар

, (3.15)

Була проведена апроксимація відповідно до комплексу наведених вище формул експериментально виміряних залежностей струму короткого замикання. При цьому вважалося, що β = 1, *R* = 0, Δ*n* = 0, для розрахунку , *В* та μ використовувалися вирази з [27-29], шуканими параметрами вважалися величини *Wph*, τ*rest*, *NFe,0* та *Em*. Результати вимірів та апроксимації при двох температурах наведені на Рис.3.3.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 3.3.** Кінетика струму короткого замикання СЕ після інтенсивного освітлення при різних температурах. Точки – експеримент, лінії – апроксимація. |

Визначені шляхом апроксимації величини параметрів склали наступні значення. *Wph* = (3,2±0,3)⋅10-4 Вт. Ця величина досить добре співпадає зі значенням 3,1⋅10-4 Вт, отриманим шляхом вимірювання потужності випромінювання використаного LED за допомогою PowerMeter Rk-5720. τ*rest*>100 с, що свідчить про те, що внесок інших рекомбінаційних каналів у досліджених зразках може бути знехтуваний. *NFe,0*=(2,0±0,4) 1013 см-3, що, з одного боку, є достатньо типовою величиною для сонячного кремнію, а з другого – є близьким до значень, отриманих за допомогою методу дослідження спектральної залежності внутрішньої квантової ефективності (0,9 1013 см-3) на зразках тієї самої серії. Нарешті, отримане значення енергії міграції атомів заліза склало *Em*= (0,655±0,002) еВ. Ця величина співпадає з відомим в літературі значенням 0,66 еВ.

Таким чином, спираючись 1) на знак зміни струму короткого замикання; 2) оборотність світлоіндукованих змін; 3) збіг отриманого значення енергії міграції атомів заліза з літературними даними можна зробити висновок, що причиною зафіксованих змін параметрів кремнієвих сонячних елементів після інтенсивного освітлення є саме розпад пар залізо-бор.

3.2 Температурні залежності параметрів СЕ

В роботі проводилися вимірювання темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) та ВАХ при монохроматичному освітленні кремнієвих сонячних елеменів до та після високоінтенсивного освітлення при температурах 300, 320 та 340 К. Проте параметри СЕ є, як правило, чутливими до темпертури і тому, щоб врахувати нагрів структур внаслідок освітлення попередньо бути дослідженні температурні залежності ВАХ. Крім того, вивчення температурних залежностей параметрів дозволяє ідентифікувати фізичні механізми перенесення заряду.

Типові ВАХ, отримані як у темряві, так і про монохроматичному (940 нм) освітленні при різних температурах представлені на Рис.3.4. Для апроксимації темнових ВАХ використовувалося дводіодна модель:

, (3.16)

де перший доданок пов’язаний з процесами рекомбінації у квазі-нейтральній області, другий – в області просторового заряду (ОПЗ); *RS* – послідовний опір, *RSH* – опір шунтування, *n*–фактор неідеальності.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Рис. 3.4.**Темнові (а) та світлові (б) ВАХ сонячного елемента, виміряні при температурах 290К (квадрати) та 340 К (кола). Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формул (3.16) (а) та (3.21) (б) | |

Температурні залежності струмів насичення *І*01 та *І*02показані на Рис.3.5. Видно, що в обох випадкахзалежності є термоактиваційними і добре описуються виразами

, (3.17)

де І00 температуро-незалежний множник, *Е*а – енергія активації. Як показали розрахунки, для *І*01ця величина становить (1,29±0,04) еВ, а для *І*02‑ (0,64±0,01) еВ.Відомо, що струми насичення мають описуватися наступними співвідношеннями

, (3.18)

, (3.19)

деd– товщина ОПЗ, τg – ефективний час життя носіїв в ОПЗ.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 3.5.**Температурні залежності струмів насичення рекомбінаційних струмів в квазі-нейтральній області (ліва шкала, квадрати) та в області просторового заряду (права шкала, кола). Точки – експеримент, лінії – експоненційна апроксимація. |

Як видно з (3.18) та (3.19), активаційна енергія для *І*01 має бути близькою до ширини забороненої зони кремнію (1,14 еВ), а для *І*02– вдвічі меншою, що і спостерігається на експерименті.

На рис.3.6 представлена температурна залежність шунтуючого опору, з якої видно, що ця величина достатньо стрімко зростає з підвищенням *Т*. Відповідно до моделі дислокаційно-індукованого імпедансу, фотовольтаїчних детекторів, запропонованої в [30]

, (3.20)

де пов’язана з густиною, площею поверхні дислокації та густиною дислокаційних станів, *E*dis– енергетичне положення рівня, з яким а пов’язана поява дислокаційного рекомбінаційного струму, *U*S – потенціал на поверхні дислокаційного ядра. Вираз (3.20) записано для випадку однакової ймовірності захоплення електронів та дірок дислокаційними станами.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 3.6.**Залежність величини шунтуючого опору від температури. Точки – експеримент, лінія – апроксимація за формулою (3.20). |

Апроксимація експериментальної кривої дозволила отримати значення (*E*dis-*Е*і)=(0,32±0,02) еВ, що відповідає енергії активації носіїв (0,24±0,02) еВ. Це значення близьке до енергії активації дислокаційних рівнів (0,22÷0,25) еВ, яка спостерігалась в [31].

З рис.3.7 видно, шо величини послідовного опору та фактору неідеальності практично не залежать від температури і дорівнюють (0,85±0,04) Ом та (2,10±0,05) відповідно.

При використаних інтенсивностях освітлення величина фотогенерованого струму *Ι*ph складала близько 150 мкА, що суттєво перевищує верхню межу струмів (~10-4А, див. Рис.3.4), при якій внесок другого доданку у виразі (3.16) є суттєвим. Як наслідок, більш доречним є апроксимація освітлених ВАХ в рамках однодіодної моделі

, (3.21)

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| **Рис. 3.7.**Температурні залежності послідовного опору (ліва шкала, квадрати) та фактору неідеальності (права шкала, кола) СЕ. | |
|  |  |
|  |  |
| **Рис. 3.8.**Температурні залежності напруги холостого ходу (а), струму короткого замикання (б), максимальної вихідної потужності (в) та фактору заповнення (г) СЕ. | |

Зауважимо, що залежності *I*0, *R*s та *n* схожі до тих, що отримані при аналізі темнових ВАХ: струм насичення є термоактивованим з енергією (1,17±0,02) еВ, а послідовний опір та фактор неідеальності температоронезалежні, правда з іншими абсолютними значеннями: (0,68±0,05) Ом та (1,06±0,02). Крім того, з освітлених ВАХ визначалися струм короткого замикання (*I*SC), напруга холостого ходу (*V*OC), максимальна вихідна потужність (*P*m) та фактор заповнення (*FF =P*m */ I*SC *V*OC). При застосовувався підхід, запропонований в роботі [32]. Температурні залежності цих параметрів представлені на Рис.3.8. Вони є достатньо типовими для сонячних елементів [33].

3.3 Вплив розпаду пар FeB на параметри СЕ

На рис.3.9 та 3.10 представлені результати, отримані шляхом апроксимації ВАХ досліджуваних структур, виміряних протягом певного періоду часу після високо інтенсивного опромінення. Як показано раніше, подібний вплив викликає розпад пар FeB і тому подібні дослідження мали на меті з’ясувати як саме перебудова цього комплексу відображається на величинах різних параметрів СЕ. При цьому зверталася увага як на величину зміни параметру, так і на характерний час релаксаційних процесів. При цьому опорними значеннями в останньому випадку слугували величини, отримані з релаксації струму короткого замикання. Так, рис.3.9 демонструє кінетичні залежності параметрів фотоелектричного перетворення в умовах асоціації пар залізо-бор. Видно, що для всіх цих параметрів спостерігаються релаксаційні процеси зі схожими часовими характеристиками, проте суттєва відмінність спостерігається для абсолютних величин змін. Так, розпад FeBвикликає зменшення *I*SC приблизно на 25%, тоді як для *V*OC ця величина складає від 8% при 340 К до 5% при 300 К, для *P*m–близько 30% незалежно від температури, а для *FF*–від 2% (340 К) до 0% (300 К).

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |
| **Рис. 3.9.**Кінетика зміни напруги холостого ходу (а), струму короткого замикання (б), максимальної вихідної потужності (в) та фактору заповнення (г) після розпаду пар FeB при різних температурах. |

Тобто, максимально чутливими до зміни стану дефектного комплексу є струм короткого замикання та максимальна вихідна потужність (яка пропорційна коефіцієнту корисної дії). Щодо напруги холостого ходу, то необхідно взяти до уваги, що знехтувавши впливом послідовного та шунтуючого опорів, вираз для неї може бути записаний у вигляді

, (3.22)

Тобто, якщо розпад пар безпосередньо спричинює зменшення довжини дифузії неосновних носіїв, а отже і *I*SC, то для *V*OCмає місце логарифмічна залежність від струму короткого замикання, причому при зменшенні температури залежність послаблюється.Враховуючи, що в нашому випадку *I*SC/*I*0 >> 1 та нехтуючи зміною величини струму насичення внаслідок розпаду пар, для відносної зміни напруги холостого ходу можна наближено записати:

, (3.23)

де індекс «0» відповідає значенням параметрів до розпаду дефектної пари. Таким чином, зменшення абсолютного значення *V*OC зі зростанням температури (Рис.3.8, а) також є причиною зменшення чутливості даного параметру до стану домішкової пари при охолодженні. Подібні міркування застосовні і до фактору форми ВАХ: як наслідок при кімнатних температурах зміни цього параметра після розпаду пар FeB мінімальні.

Водночас, максимальна вихідна потужність суттєво зменшується після інтенсивного освітлення, а отже, поряд зі струмом короткого замикання, може бути індикатором перетворень в системі рекомбінаційних центрів.

На рис.3.10 представлено результати, отримані для параметрів, що описують темнові ВАХ. На відміну від характеристик фотоелектричного перетворення, ці величини в переважній більшості не залежать від стану пари FeB. Виключення становлять лише струм насичення, пов’язаний з рекомбінацією в базі СЕ та послідовний опір (Рис.3.10, а, в).

|  |
| --- |
| ї |
|  |
|  |
|  |
|  |
| **Рис. 3.10.**Кінетика зміни струмів насичення рекомбінаційних струмів в квазі-нейтральній області (а) та в ОПЗ (б), послідовного (в) та шунтуючого (г) опорів і фактору неідеальності (д) після розпаду пар FeBпри різних температурах. |

Для *I*01 це цілком очікувано: величина явно залежить від часу життя неосновних носіїв – див. формулу (3.18). Зауважимо лише, що зі зменшенням температури зміни *I*01після розпаду зменшуються.

Послідовний опір СЕ пов’язується [23] з опором матеріалу та контактним опором, причому перший зазвичай є температуронезалежним, а другий зростає при охолодженні структури. В нашому випадку *R*S практично не залежить від температури (див. Рис.3.7), що свідчить про можливість знехтування контактною складовою послідовного опору.

Як показують результати експериментів, після інтенсивного освітлення величина послідовного опору зростає, а через певний проміжок часу повертається до вихідного значення. Проте, на нашу думку, цей ефект не пов’язаний із зруйнуванням пари FeB. На користь цього свідчить відмінність кінетичних залежностей змін *R*S та *I*SC: зменшення опору відбувається практично лінійно з часом і відновлення вихідного значення відбувається через ~1500 с незалежно від температури (рис.3.10, в). Причини світлоіндукованої зміни послідовного опору потребують подальшого дослідження.

висновки

1. Проведено дослідження змін параметрів кремнієвих сонячних елементів після інтенсивного освітлення та показано, що в досліджуваних структурах переважаючим ефектом є розпад пар FeB.
2. Виявлено, що найбільш чутливими до розпаду пар залізо-бор є струм короткого замикання та максимальна вихідна потужність, тоді як відносні зміни напруги холостого ходу та коефіцієнта форми ВАХ значно менші і суттєво спадають при зменшенні температури.
3. Показано, зміна стану домішкового заліза не впливає на рекомбінаційний струм в області просторового заряду, фактор неідеальності та дислокаційно-індукований шунтуючий опір. Виявлено оборотній ефект світлоіндукованого збільшення послідовного опору.

список використаної літератури

1. *J.O. Bodunrin, D.A. Oeba, S.J. Moloi* / Current-voltage characteristics of iron-implanted silicon based Schottky diodes // *Materials Science in Semiconductor Processing.* – 2021. – Mar. – Vol.123. – P.105524.
2. *V.Vähänissi, A.Haarahiltunen, H.Talvitie, M.Yli-Koski,H.Savin* / Impact of phosphorus gettering parameters and initial iron level on silicon solar cell properties // *Prog. Photovolt. Res. Appl.* – 2012. –Vol.21. – P.29.
3. *G.W. Ludwig, H.H. Woodbury*: In Solid State Physics, ed. by F. Seitz, D. Turnbull (Academic, New York 1962) p.223
4. *H. Feichtinger*/ Defects and Radiation Effects in Semiconductors //*Inst. Phys. Conf*.*Ser.*–1979. –Vol.46.–P.528.
5. *K. Graff, H. Pieper*/ The Properties of Iron in Silicon //*J. Electrochem. Soc*. –1981. –Vol.128. – P.669.
6. *E. Weber*: Crystal Res. Technol. 16, 209 (1981)
7. *H. Feichtinger*: Acta Phys. Austr. 51, 161 (1979)
8. *X. Gao, H. Mollenkopf, S. Yee*/Annealing and profile of interstitial iron in boron‐doped silicon //*Appl. Phys. Lett.*–1991. –Vol.59. –P. 2133.
9. *K. Wunstel, P. Wagner*/Interstitial iron and iron-acceptor pairs in silicon//*Appl. Phys.* – 1982. –Apr. –Vol.27.– P.207.
10. *G. Zoth, W. Bergholz*/ A fast, preparation‐free method to detect iron in silicon // *J. Appl. Phys.* –1990. –Vol.67.–P. 6764.
11. *L.C. Kimerling*: In Defects in Semiconductors, ed. by J. Narayan, T.Y. Tan (North-Holland, Amsterdam 1981) p.85
12. *W. Wijaranakula*/The Reaction Kinetics of Iron‐Boron Pair Formation and Dissociation in P‐Type Silicon // *J. Electrochem. Soc.*– 1993. – Vol.140.–P.275.
13. *H. Nakashima, T. Isobe, Y. Yamamoto, K. Hashimoto* / Diffusion coefficient of iron in silicon at room temperature//*Jpn. J. Appl. Phys.*–1988. –Vol.27.– P.1542.
14. *J. Lagowski, P. Edelman, A.M. Kontkiewicz, O. Milic, W. Henley, M. Dexter, L. Jastrzebski, A.M. Hoff*/ Iron detection in the part per quadrillion range in silicon using surface photovoltage and photodissociation of iron‐boron pairs // *Appl. Phys. Lett.*– 1993. – Vol.63.– P.3043.
15. *L.C. Kimerling*/Recombination enhanced defect reactions //*Solid State Electron.*– 1978.– Vol.21.– P.1391.
16. *J.D. Weeks, J.C. Tully, L.C. Kimerling*/Theory of recombination-enhanced defect reactions in semiconductors //*Phys. Rev. B*.– 1975. – Oct. – Vol.12.– P.3286.
17. *H. Lemke* / Energy levels and binding energies of ion pairs in silicon // *Phys. Status Solidi A.*– 1983. – Vol.76.– P. 223.
18. *D.Macdonald, A.Cuevas, L.J.Geerligs* / Measuring dopant concentrationsincompensated p-type crystalline silicon via iron-acceptor pairing // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 202119.
19. *L.J.Geerligs, D. Macdonald* / Dynamics oflight induced FeB pair dissociation in crystalline silicon // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 85. – Pp. 5227-5229.
20. *T. Niewelt, J. Schoon, W. Warta* / Degradation of Crystalline Silicon Due to Boron-Oxygen Defects // *IEEE Journal of Photovoltaics.* – 2017. – Jan. – Vol.7, no. 1. – Pp. 383 – 398.
21. *Fiacre E. Rougieux, C. Sun, D. Macdonal* / Determiningthecharge states and capture mechanisms of defectsinsiliconthrough accurate recombination analyses: A review // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* –2018. –Vol.187. – Pp. 263-272. – https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.029
22. *Jan Schmidt* / Effect of Dissociation of Iron–Boron Pairs in Crystalline Silicon on Solar Cell Properties // *Prog. Photovolt. Res. Appl.* – 2005. – May. – Vol.13. – Pp. 325-331.
23. *A. V. Sachenko, Yu. V. Kryuchenko, V. P. Kostylyov, A. V. Bobyl, E. I. Terukov, S. N. Abolmasov, A. S. Abramov, D. A. Andronikov, M. Z. Shvarts, I. O. Sokolovskyi, M. Evstigneev* / Temperature dependence of photoconversion efficiency in silicon heterojunction solar cells: Theory vs experiment // *J. Appl. Phys.* – 2016. – Vol.119. – P. 225702
24. R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti / Reassessmentoftheintrinsiccarrierdensitytemperature dependence in crystalline silicon // *J. Appl. Phys.* – 2014. –Vol. 115. – P. 093705.
25. *Pietro P. Altermatt, Jan Schmidt, Gernot Heiser, Armin G. Aberle* / Assessment and parameterisation of Coulomb-enhanced Auger recombination coefﬁcients in lowly injected crystalline silicon // *J. Appl. Phys.* – 1997. –Vol.82. – P.4938.
26. *J. D. Murphy, K. Bothe, M. Olmo, V. V. Voronkov, R. J. Falster* /The effect of oxide precipitates on minority carrier lifetime in p-type silicon //*J. Appl. Phys.* – 2011. –Vol.110. – P.053713.
27. *Augustin McEvoy, T. Markvart, L. Castaner* / SolarCells //*Materials, ManufactureandOperation*. – 2013.–Secondedition. – Oxford:AcademicPress.– P.641.
28. *Hieu T. Nguyen, Simeon C. Baker-Finch, D. Macdonald* / Temperaturedependenceoftheradiativerecombinationcoefficientincrystallinesiliconfromspectralphotoluminescence // *Appl. Phys. Lett.*–2014.– Vol.104. – P. 112105. –http://dx.doi.org/10.1063/1.4869295
29. *D.B.M.Klaassen*/ A unified mobility model for device simulation—I. Model equations and concentration dependence // *Solid-StateElectronics*. –1992. –Vol. 35, no. 7.–Pp. 953-959.
30. *V. Gopal, S. Gupta* / Contribution of dislocations to the zero-bias resistance-area product of LWIR HgCdTe photodiodes at low temperatures // *IEEE Trans. Electron Devices.* – 2004. – Jul. – Vol.51, no. 7. – Pp. 1078-1083.
31. *J. Evans-Freeman, D. Emiroglu, K. Vernon-Parry, J. Murphy, P.R. Wilshaw* / High resolution deep level transient spectroscopy applied to extended defects in silicon // *J. Phys. Condens. Matter.*–2005. –Vol.17, no.22.–Pp. 19-27. –https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/22/009
32. *B.Paviet-Salomon, J.Levrat, V.Fakhfouri, Y. Pelet, N.Rebeaud, M. Despeisse, C.Ballif* / New guidelines for a more accurate extraction of solar cells and modules key data from their current–voltage curves // *Prog. Photovolt. Res. Appl.* – 2017. – Vol.25. – Pp.623-635.
33. *Priyanka Singh, N.M. Ravindra* / Solar Energy Materials & Solar Cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells.*–2012. – Vol.101.– Pp. 36-45.