МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Особливості світло-індукованого розпаду комплексів Fe-B у монокристалічному кремнії**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика наносистем

**Кваліфікаційна робота магістра**

студента 2 курсу

Артем КОСТИНА

**Науковий керівник**:

доктор фізико-математичних наук,

професор, професор кафедри загальної фізики

Олег ОЛІХ

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №\_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023р.

Завідувач кафедри загальної фізики проф. Микола БОРОВИЙ

Київ – 2023

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ виконав та захистив кваліфікаційну роботу магістра з оцінкою \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 р.

**АНОТАЦІЯ**

**Артем Костина.** Особливості світло-індукованого розпаду комплексів Fe-B у монокристалічному кремнії

*Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика та астрономія». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ – 2023.*

**Науковий керівник**: доктор фізико-математичних наук, професор Олег ОЛІХ, професор кафедри загальної фізики.

Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація Анотація

**Ключові слова**: ключові слова.

**SUMMARY**

**Shatlik ILAMANOV.** Features of light-induced disasiation of Fe-B complexes in monocrystalline silicon.

*Bachelor qualification in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Physics and astronomy». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, General Physics Department. – Kyiv. – 2023*.

**Research supervisor**: Doctor of Physicі and Mathematics, Professor Oleg OLIKH, Professor at General Physics Department.

Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract Abstract

**Key words**: key words.

**ЗМІСТ**

[ВСТУП 4](#_Toc131580593)

[Розділ 1. Огляд літератури 5](#_Toc131580594)

[1.1. 5](#_Toc131580595)

[1.2. 5](#_Toc131580596)

[1.3. 5](#_Toc131580597)

[Розділ 2. Методика експерименту 6](#_Toc131580598)

[2.1 Експериментальна установка 6](#_Toc131580599)

[2.2 Результати калібрування джерел світла 6](#_Toc131580600)

[2.3 Зразки 8](#_Toc131580601)

[Розділ 3. Отримані результати 9](#_Toc131580602)

[3.1 Особливості реалізації лабораторної роботи 9](#_Toc131580603)

[Висновки 10](#_Toc131580604)

[Список використаних джерел 11](#_Toc131580605)

# ВСТУП

# Розділ 1. Огляд літератури

## 1.1.

## 1.2.

## 1.3.

# Розділ 2. Методика експерименту

## 2.1 Експериментальна установка

## 2.2 Результати калібрування джерел світла

Для світло-індукованої дисоціації пар FeB використовувалися 3 потужні галогенові лампи різних виробників. А саме

Haltlichtspiegel 52240.0, 24 В, 200 Вт – надалі її позначатимемо Orion;

Osram 64653 HLX ELC, 24 В, 250 Вт (Osram);

General Electric 43537 H271, 20 В, 150 Вт (GE).

Калібрування випромінювання цих джерел здійснювалося на виході світловоду, тобто оцінювався світловий потік, який безпосередньо потрапляв на зразок. Для живлення ламп використовувалося регулюване джерело живлення ITECH IT6332В, яке дозволяло встановити струм, що протікає через лампу з точністю до 1 мА. Калібрування за інтегральною потужністю випромінювання Will здійснювалося за допомогою цифрового вимірювача оптичної потужності та енергії THORLABS PM100D; при цьому використовувався широкосмуговий датчик S401C (вхідний діапазон 0,19-20 мкм, максимальна вхідна оптична потужність – 1 Вт). Були проведені вимірювання оптичної потужності як функції сили струму, що споживає лампа Il – див. рис.2.3. Як видно, максимальна потужність світлового потоку для GE може досягати 400 мВт, для Osram – 800 мВт, для Orion – 1 Вт. Надалі під час освітлення зразків інтегральна інтенсивність контролювалася саме за величиною споживаного струму.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.3 Калібрувальні криві використаних джерел освітлення. |

Спектр випромінювання використаних ламп вимірювався за допомогою монохроматора МСД12 з використанням ФЕП40 з Пельт’є охолодженням. Так на рис.2.3 наведено залежності спектральної випромінювальної здатності ωill лампи Osram при різних інтегральних інтенсивностях. Наведені дані є типовими для всіх використаних ламп і відображають основні особливості, а саме: 1) фактично все випромінювання знаходиться в діапазоні 400-800 нм; 2) при збільшенні Will спостерігається зсув спектру у короткохвильову область.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.2.4 Спектри випромінювання лампи Osram при різних інтегральних інтенсивностях (а) та їх нормовані значення (б) | |

З іншого боку, спектри різних ламп не тотожні (див. рис.2.5) і відрізняються як положенням максимуму випромінювальної здатності так і внесками довгохвильової та короткохвильової компонент.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.5 Спектри випромінювання використаних джерел при однаковій інтегральній потужності |

## 2.3 Зразки

Для досліджень було використано кремнієві сонячні елементи (КСЕ) дифузійно-польового типу зі структурою *n+-p-p+*, структура яких показана на рис. 2.6. Для їхнього виготовлення використовувалися монокристалічні пласнини кремнію КДБ10 товщиною 380 мкм. Р-n та антирекомбінаційний ізотипний переходи були сформовані шляхом дифузії фосфору та бору з газової фази, відповідно. Товщини n+- та p+ шарів складали 0,7 та 0,6 мкм відповідно, їхні опори ‑ 20-30 Ом/ та 10-20 Ом/. На фронтальній поверхні KСЕ були наявні також просвітлюючі покриття з двоокису кремнію SiO2 товщиною 30 нм і нітриду кремнію Si3N4 товщиною 40 нм. В експериментах використовувалися зразки розміром 1,52×1,523 см2. Тестові вимірювання проводилися на трьох різних зразках; основний масив даних отримано для зразка з максимальною концентрацією заліза (близько 9⋅1012 см-3).

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.6 Схема КСЕ. 1 – фронтальний 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) |

# Розділ 3. Отримані результати

## 3.1 Визначення характерного часу дисоціації пар FeB

Як вже зазначалося раніше, основними дефектами, пов’язаними з домішковим залізом у монокристалічному кремнії, легованому бором, є міжвузольні атоми Feі та пари FeiBs. Причому за рівноважних умов більшість атомів заліза будуть утворювати пари, а залишкова рівноважна кількість неспарених атомів *N*Fe,eq суттєво залежатиме від температури [1]. Зокрема, при 340 К *N*Fe,eq складає близько 10% від загальної кількості атомів заліза *N*Fe,tot в кристалі. Якщо стимулювати дисоціацію пар, а це, як відомо, можна реалізувати зокрема використовуючи освітлення, то рівноважне співвідношення між концентраціями міжвузольних атомів заліза та парами FeB може бути визначена за допомогою наступних реакцій [2,3]

 (3.1)

де *Ra*  та *Rd* – темпи асоціації та дисоціації пари FeB, відповідно. Як показано в [2,3], часова залежність концентрації міжвузольних атомів під час інтенсивного освітлення описується виразом:

, (3.2)

де *t*ill – час освітлення. В свою чергу, після припинення дії вимушуючого фактору, буде відбуватися лише асоціація пар (перша реакція з системи (3.1)) і часова залежність концентрації Feі матиме вигляд [1,4]

, (3.3)

де *t* – час після закінчення освітлення, *N*Fe,0 – концентрація міжвузольних атомів, сформована в результаті освітлення ().

В роботі проводилося вивчення залежності *N*Fe,0 від часу освітлення при використанні різних значень потужності освітлення та різних джерел. Відповідно до даних роботи [5], при використанні інтенсивності освітлення більше 0,1 Вт/см2 можлива майже повна (більше 99%) дисоціація пар FeB. Враховуючи цей факт, освітлену площу зразка та характеристики ламп (див. рис.2.3) дослідження проводилися для Orion з використанням значень *W*ill 750, 700, 600, 500, 400, 300 та 200 мВт, для Osram - 700, 600, 500, 400, 300 та 200 мВт, для GE – 400, 300 та 200 мВт.

Значення *N*Fe,0 визначалися за методикою, описаною в п.1.3, що спирається на вивчення кінетики струму короткого замикання при монохроматичному освітленні, яке викликає рівномірну генерацію носіїв в базі сонячного елементу. Для цього зразок освітлювався протягом часу *t*ill (з використанням певних значень *W*ill та ламп), після чого галогенове джерело вимикалося і проводилися вимірювання ВАХ кожні 21 секунду на протязі інтервалу часу близько 3000 с. Інтервал був вибраний з врахуванням відомого [6,7] часу асоціації пари τass, який при даній концентрації бору в базі КСЕ та температурі вимірювань (340 К) має бути рівний близько 600 с. Зауважимо, що експериментальні дослідження показали, що τass = *Ra*-1 = (590±10) c, що цілком відповідає очікуванням. Також зазначимо, що згідно з даними роботи [5], у випадку освітлення з інтенсивність меншою 0,01 Вт/см2 розпад пар FeB не спостерігається. В нашому випадку вимірювання ВАХ відбувалося при монохроматичному освітленні (LED) потужністю 500 мкВт і тому його впливом цього освітлення на концентрації залізо-вмісних можна знехтувати.

На рис.3.1 наведено типові приклади ВАХ, виміряних через різні проміжки часу після закінчення високоінтенсивного освітлення. З представлених результатів видно, що після припинення освітлення спостерігається поступове покращення параметрів фотоелектричного перетворення, про що свідчить зростання як струму короткого замикання, так напруги холостого ходу. Це пов’язано зі зменшенням рекомбінаційної активності дефектної системи КСЕ, яке віддзеркалює перехід міжвузольного заліза у зв’язаний стан з акцептором. Водночас, наприкінці інтервалу вимірювань зміни ВАХ мінімальні, тобто вибраного проміжку часу 50 хв достатньо для завершення процесу асоціації.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.3.1 Вольт-амперні характеристики, виміряні через різний час після інтенсивного освітлення. Лампа GE, *t*ill = 50 c. |

На наступному рисунку, 3.2, представлені часові залежності струму короткого замикання після освітлення з різною тривалістю та потужністю. Як показано в роботі [3], величина змін Ιsc після витримки КСЕ в темряві монотонно залежить від концентрації міжвузольних атомів заліза, утворених внаслідок світло-індукованої дисоціації FeB. З наведених даних видно, що збільшення величин till та Will спричинює зростання ефективності розпаду. Водночас, час відновлення не залежить від параметрів освітлення, що також збігається з передбачуваною поведінкою, так як в цьому випадку визначальною є величина τass.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.3.2 Кінетика відновлення струму короткого замикання після освітлення з різною тривалістю та постійною інтегральною потужністю (а) та однаковою тривалістю та різною потужністю (б). Лампи Orion (a) та Osram (б). Точки – експеримент, лінії – апроксимація за формулами, наведеними в розділі 1.3 | |

Залежності концентрації світло-дисоційованих пар від час освітлення показані на рис.3.3. Як видно з наведених даних, темп розпаду суттєво залежить від потужності освітлення і подібний ефект спостерігається для всіх використаних джерел. Водночас, величина Will не є єдиним визначальним фактором для темпу розпаду пар, що яскраво проілюстровано на рис.3.3д. Так, при використанні лампи GE дисоціація пар відбувається найбільш ефективно, для Οsram процес більш повільний, а освітлення за допомогою Orion за інших однакових умов найменш продуктивне з точки зору зміни стану пари залізо-бор.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
| Рис.3.3 Залежності концентрації пар FeB, що розпалися внаслідок освітлення з різною інтенсивністю, від його тривалості. Лампи Orion (a), Osram (б), GE (в). Частина д ілюструє відмінності світло-індукованого розпаду пар при використанні різних джерел. Точ- експеримент, лінії – апроксимація за формулою (3.4) | |

Отримані залежності величини *N*Fe,0 від часу освітлення були апроксимовані з використанням виразу

, (3.4)

Де τdis – характерний час дисоціації, *N*Fe,fit – концентрація дисоційованих пар, що відповідає насиченню. Графічні результати апроксимації показані на рис.3.3, числові значення – в табл.3.1. В таблиці (остання колонка) також подані значення коефіцієнтів детермінації *R*2, величини яких (>0,99) свідчать доцільність застосування вибраної апроксимаційної формули.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Табл.3.1 Параметри, визначені шляхом апроксимації експериментальних кривих відповідно до формули (3.4) | | | | |
| *W*ill, мВт | Лампа | τdis, c | *N*Fe,fit, 1012 см-3 | *R*2 |
| 750 | Orion | 2,2±0,2 | 8,6±0,1 | 0,993 |
| 700 | Orion | 2,4±0,2 | 8,5±0,1 | 0,995 |
| Osram | 2,4±0,2 | 8,6±0,1 | 0,992 |
| 600 | Orion | 3,7±0,2 | 8,65±0,06 | 0,998 |
| Osram | 3,0±0,2 | 8,68±0,08 | 0,995 |
| 500 | Orion | 5,5±0,2 | 8,65±0,04 | 0,999 |
| Osram | 4,5±0,1 | 8,7±0,1 | 0,998 |
| 400 | Orion | 8,8±0,3 | 8,74±0,06 | 0,998 |
| Osram | 6,1±0,3 | 8,63±0,08 | 0,997 |
| GE | 3,6±0,3 | 8,7±0,1 | 0,996 |
| 300 | Orion | 15,7±0,6 | 8,6±0,1 | 0,998 |
| Osram | 12,4±0,1 | 8,69±0,02 | 0,999 |
| GE | 6,5±0,2 | 8,69±0,05 | 0,998 |
| 200 | Orion | 42±3 | 8,6±0,3 | 0,998 |
| Osram | 20,0±0,7 | 8,53±0,09 | 0,999 |
| GE | 15,1±0,5 | 8,7±0,1 | 0,999 |

Порівняння виразів (3.2) та (3.4) показує взаємозв’язок між апроксимаційними параметрами та характеристиками дефектів, а саме:

 (3.5)

Дані, наведені в табл.3.1 показують, що незалежно від використаного джерела освітлення та його потужності, отримана загальна концентрація домішкового заліза складає величину *N*Fe,tot = (8,7±0,1) см-3, що, з одного боку, цілком виправдано, бо використовувався один зразок, а з іншого слугує додатковим підтвердженням коректності отриманих результатів. Водночас значення характерного часу дисоціації пари при однаковому значенні інтегральної потужності може відрізнятися в декілька разів залежно від джерела.

## 3.2 Залежність темпу світло-індукованого розпаду комплексів Fe-B від спектрального складу освітлення

В літературі показано [2,6,7], що темп дисоціації пар FeB при світло-індукованому розпаді має залежати від темпу генерації носіїв G:

, (3.6)

де показник ступеня *m* має бути близьким до 2, що відображає двостадійність процесу розпаду. Щодо коефіцієнту пропорційності *К*, то відомо [6,7], що він може залежати від температури та наявності інших (окрім залізо-вмісних дефектів) каналів рекомбінації. Проте інформація про залежність цієї величини від спектрального складу освітлення, як нам відомо, відсутня.

В роботі величини темпу дисоціації обчислювалися з використанням даних табл.3.1 та першого рівняння системи (3.5). Для діапазону довжин хвиль 400-800 нм, в якому знаходиться випромінювання використаних ламп (див. рис.2.5) коефіцієнт поглинання світла в кремнії має величину (8,3⋅104±1⋅107) м-1 [8]. Тобто, в нашому випадку відбувається повне поглинання світла в сонячному елементі (товщина 380 мкм). Вважаючи, що наслідком поглинання одного фотону є генерація однієї електронно-діркової пари, значення G розраховувалися як загальне число фотонів, що потрапляє на зразок

, (3.7)

де *N*ph (λ) – кількість фотонів при певній довжині хвилі випромінювання:

. (3.8)

Отримані залежності Rd (G) в логарифмічному масштабі представлені на рис.3.4. Як видно з представлених даних, залежності лінійні, що свідчить про дійсну показникову залежність між темпами дисоціації пари та генерації надлишкових носіїв і дійсно значення m близьке до 2 – див.табл.3.2. Проте, як показують проведені дослідження, точна величина показника ступеня, як і коефіцієнта пропорційності залежать від використаного джерела світла.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.3.4 Залежність темпу дисоціацій пар FeB від темпу генерації носіїв при освітленні КСЕ з використанням різних джерел |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Табл.3.2 Параметри розпаду пар FeB при використанні різних джерел | | | | |
| лампа | *R*d, с-1 | *G*, 1018 с-1 | *m* | *K*, 10-37 c |
| (*W*ill = 400 мВт) | |
| Orion | 0,11±0,01 | 1,22±0,01 | 2,30±0,04 | 0,87±0,03 |
| Osram | 0,16±0,01 | 1,20±0,01 | 1,81±0,09 | 1,00±0,02 |
| GE | 0,28±0,03 | 1,19±0,01 | 2,12±0,02 | 1,92±0,03 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.3.5 Залежності темпу генерації електронів (а) та середньої енергії фотонів (б) для різних використаних джерел | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.3.6 Нормовані значення кількості фотонів для різних ламп при однаковій інтегральній потужності випромінювання (а) та лампи GE при різних величинах Will (б) | |

. (3.9)

# Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження розпаду пар FeB у кремнієвих сонячних елементах залежно від потужності світлового потоку та його спектрального складу.

2. Виявлено, що ефективність світло-індукованої дисоціації зростає зі збільшенням енергії фотонів, які генерують надлишкові носії, а точне значення показника залежності темпу дисоціації від темпу генерації носіїв визначається перебудової спектру випромінювання джерела світла при збільшенні інтегрального потоку.

3. Показано, що більш ймовірною причиною другої стадії розпаду пари FeB є рекомбінаційно-підсилені процеси, а не іонізація іону заліза.

# Список використаних джерел