МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Кінетика фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів, викликана перебудовою пар FeB**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика та астрономія

**Кваліфікаційна робота бакалавра**

студента 4 курсу

Іван КУЩ

**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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2024р.

Завідувач кафедри загальної фізики проф. Микола БОРОВИЙ

Київ – 2024

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

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

Голова ЕК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2024 р.

**АНОТАЦІЯ**

**Шатлик ІЛАМАНОВ.** Кінетика фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів, викликана перебудовою пар FeB

*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.** Kinetics of photoelectric parameters of silicon solar cells caused by the rebuilding of FeB pairs.

*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](#_Toc132809314)

[Розділ 1. Огляд літератури 6](#_Toc132809315)

[1.1. 6](#_Toc132809316)

[1.2. 6](#_Toc132809317)

[1.3. 6](#_Toc132809318)

[Розділ 2. Методика роботи 7](#_Toc132809319)

[2.1 Експериментальна установка та зразки 7](#_Toc132809320)

[2.2 Особливості моделювання кінетики фотоелектричних параметрів 9](#_Toc132809321)

[Розділ 3. Отримані результати 12](#_Toc132809322)

[3.1 Результати моделювання 12](#_Toc132809323)

[3.2 Результати експериментального дослідження 17](#_Toc132809324)

[Висновки 23](#_Toc132809325)

[Список використаних джерел 24](#_Toc132809326)

# ВСТУП

# Розділ 1. Огляд літератури

## 1.1.

## 1.2.

## 1.3.

# Розділ 2. Методика роботи

## 2.1 Методика виготовлення зразків

В роботі проводилося виготовлення діодних структур з кремній – полімер. Для цього на монокристалічні пластини кремнію з електронною провідністю методом спінінгування наносився шар poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS), після чого для утворення омічних контактів з боку полімеру напилявся шар срібла, а з тильної сторони механічним способом наносився шар евтектики GaZn. Послідовність дій була наступна:

1. Травлення кремнію в 30%-розчині HF протягом 15 c.

2. Промивання пластини в дистильованій воді.

3. Нанесення розчину PEDOT:PSS.

4. Спінінгування на протязі 30 с зі швидкістю обертання ω.

5. Витримка зразків при кімнатній температурі тривалістю td.

6. Відпал при температурі 140 °С на протязі 15 хв.

7. Вакуумне напилення срібного контакту на полімерну плівку.

8. Відколювання запилених країв структур.

9. Втирання контакту ZnGa.

В роботі використовувалися пластини n-Si легованого фосфором з питомим опором 1-10 Ом см товщиною 525±25 мкм, з яких вирізалися елементи розміром 1×1 см2. Кінцева (після розколювання) площа зразків S складала від 10 до 20 мм2. Для створення полімерного шару використовувався водний (3-4)% розчин PEDOT:PSS (655201-25G). Використовувалися дві швидкості спінінгування: 3000 та 5000 об/хв в залежності від зразка. Крім того, варіювався час ізотермічної витримки td: 20 хв або 50 хв. Для кожного з вибраних режимів виготовлювалося декілька зразків, які надалі маркуватимуться за схемою DX-Y, де Х – кількість тисяч обертів за хвилину під час спінінгування, Y – величина td. Наприклад, D3-50 стосуватиметься зразків, при виготовленні яких застосовувалося спінінгування зі швидкістю 3000 об/хв та які витримувалися при кімнатній температурі протягом 50 хв.

Крім того, частина зразків під час ізотермічної витримки при кімнатній температурі піддавалася ультразвуковій обробці. Для цього зразок розміщувався на поверхні п’єзоперетворювача, в якому збуджувалися повздовжні (частотою 2,5 МГц) або радіальні (500 кГц) коливання. Акустичний контакт створювався до допомогою вакуумного масла або спеціального гелю на водяній основі. Відповідні зразки позначатимуться літерою «u»: DX-Yu.

Метою роботи було визначення впливу вказаних факторів виготовлення (швидкість спінінгування, час витримки при кімнатній температурі, наявність ультразвукової обробки) на електрофізичні параметри діодних структур.

## 2.2 Експериментальні методики

В роботі проводилися наступні вимірювання діодних структур:

- вольт-фарадних (CV) характеристик;

- залежностей ємності від частоти (C-f);

- залежностей активного та реактивного опору від частоти (RR-f);

- вольт-амперних характеристик (ВАХ).

CV, C-f та RR-f вимірювання проводилися за допомогою LRC вимірювач Sourcetronic ST2829C. Амплітуда вимірювального сигналу складала 10 мВ. CV характеристики вимірювалися в діапазоні -1,5-1,5 В на частотах 1 МГц, 100 кГц та 10 кГц. Діапазон C-f та RR-f вимірів складав від 1кГц до 1Мгц, причому частотна залежність ємності визначалася при зворотній зміщеннях від 1,2 до 0 В, а залежності імпедансу – при нульовому зміщення та прямому 0,4 В.

Для вимірювання прямих ділянок ВАХ використовувався джерело-вимірювач постійного струму Keithley 2450. Вимірювання проводилися в діапазоні до 1 В з кроком 10 мВ.

Експерименти проводилися при кімнатній температурі, для її контролю використовувався елемент P100, величина опору якого визначалася за допомогою мультиметра Keithley DMM6500.

# Розділ 3. Отримані результати

## 3.1 Вольт-фарадні характеристики

Типові СV-характеристики досліджуваних зразків наведено на рис.3.1. Видно, що ємність структури залежить від частоти вимірювання, особливо при прямому зміщенні. Відомо, що при зменшенні частоти внесок у ємність починають давати більш повільні енергетичні рівні.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.3.1. Типові вольт-фарадні характеристики досліджуваних структур. Зразки D3-20u (а) та D3-20 (б). | |

З літератури відомо, що доцільно окремо аналізувати прямі та зворотні ділянки подібних характеристик. Зокрема, при зворотному зміщенні ємність діодної структури С має визначатися концентрацією носіїв Ν та висотою бар’єру Vb [1]:

, (3.1)

де ε – діелектрична проникність напівпровідника (в нашому випадку ε=11,7), V – прикладена зворотна напруга. Тобто, використовуючи зворотну вольт-фарадну характеристику (ВФХ) можна визначити профіль легування N(x), де концентрація носіїв у певній точці визначається через похідну по напрузі від величини, оберненої до квадрату ємності

, (3.2)

а відстань даної точки від границі розділу

. (3.3)

На рис.3.2 приведені типові результати розрахунку концентрації носіїв. Зауважимо, що вимірювання на частоті 1 МГц дають значення N, трохи нижчі ніж на інших частотах. Крім того, при 1 МГц спостерігається залежність N від глибини, неочікувана для кремнієвих пластин, які використовувалися. Тому для оцінки N у зразках використовувалися дані отримані при частотах 100 кГц та 10 кГц.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.3.2. Типова залежність концентрації носіїв від відстані до границі розділу. Зразки D3-20u (сімейства кривих 1 та 2) та D3-20 (3, 4). Ємність вимірювалась при частотах 1 МГц (1, 3) та 100 кГц (2,4). Різні криві в одному сімействі відповідають різним вимірюванням |

Отримані результати показали, що концентрація носіїв у різних зразках становить (1-2)×1014 см-3. Залежності концентрації від параметрів виготовлення не виявлено. Зауважимо, що номінальному опору пластин (1-10) Ом см відповідає концентрація електронів (0,5-5) ×1014 см-3. Тобто отримані дані цілком відповідають очікуванням.

Як видно з виразу (3.1), залежність величини, оберненої до квадрату ємності від напруги має бути прямою, причому перетин відповідної апроксимуючої лінії з віссю напруг дозволяє оцінити висоту бар’єру. На рис.3.3 наведено подібні побудови для декількох зразків. Видно, що висота бар’єру залежить від 1) частоти вимірювального сигналу; 2) методу виготовлення структур. Проаналізуємо отримані дані окремо для кожної частоти. Надалі будемо вказувати у нижньому індексі частоту вимірювання: наприклад *V*b,1M означатиме висоту бар’єру визначену при вимірювальному сигналі 1 МГц.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.3.3. Залежності оберненої ємності від напруги зворотного зміщення. |

На рис.3.4 наведені значення висот бар’єрів, визначені для зразків різних серій. Видно, що навіть для структур, виготовлених з використанням певного режиму існує розкид даних. Для їхнього представлення та аналізу застосовувалася наступна процедура.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.3.4. Величини висоти бар’єру, визначені з ВФХ при 1МГц для зразків різних серій. |

## 3.2 Результати експериментального дослідження

# Висновки

1. Проведено моделювання та експериментальне дослідження кінетики змін напруги розімкнутого кола, струму короткого замикання, максимальної вихідної потужності та фактору форми кремнієвих сонячних елементів, викликаних утворенням пар залізо-бор з міжвузольних атомів заліза.

2. Виявлено, що характерний час відновлення фотоелектричних параметрів, пов’язаного з утворенням комплексу FeB, відрізняється від характерного часу перебудови дефектної підсистеми та зростає за збільшенням ступеня попередньої дисоціації пар.

3. Показано в результаті моделювання та підтверджено експериментально, що викликані розпадом пар FeB абсолютна амплітуда зміни напруги розімкнутого кола та відносні амплітуди змін струму короткого замикання та максимальної вихідної потужності можуть бути використані для оцінки концентрації домішкового заліза у кремнієвих сонячних елементах.

# Список використаних джерел

[1]

[1] Burgelman M. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells / M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 361‑362. – P. 527‑532.

[2]

[3]

[4] O'Mara W.C. Handbook of semiconductor silicon technology / W.C. O'Mara, R.B. Herring, L.P. Hant. – New Jersey, USA: Noyes Publications, 1990. – 795 р.

[5] Green M. A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon / M.A. Green // J. Appl. Phys.. – 1990. – Vol. 67. – P. 2944‑2954.

[6] Passler R. Dispersion-related description of temperature dependencies of band gaps in semiconductors / R. Passler // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 085201.

[7] Yan D. Empirical determination of the energy band gap narrowing in p+ silicon heavily doped with boron / D. Yan, A. Cuevas // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 116. – P. 194505.

[8] Couderc R. Reassessment of the intrinsic carrier density temperature dependence in crystalline silicon / R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – P. 093705.

[9] Klaassen D.B.M. A unified mobility model for device simulation ‑ I. Model equations and concentration dependence / D.B.M. Klaassen // Solid-State Electron. – 1992. – Vol. 35. – P. 953‑959.

[10]

[11]

[12] Rougieux, F. E. Determining the charge states and capture mechanisms of defects in silicon through accurate recombination analyses: A review / F. E. Rougieux, C. Sun, D. Macdonald // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. — 2018. — Vol. 187. — P. 263–272.

[13] The eﬀect of oxide precipitates on minority carrier lifetime in p–type silicon / J. D. Murphy, K. Bothe, M. Olmo et al. // J. Appl. Phys. — 2011. — Vol. 110 — P. 053713.

[14] Wijaranakula, W. The Reaction Kinetics of Iron–Boron Pair Formation and Dissociation in P–Type Silicon / W. Wijaranakula // J. Electrochem. Soc. —1993. — Vol. 140. — P. 275–281.

[15] Iron-boron pairing kinetics in illuminated p-type and in boron/phosphorus co-doped n-type silicon / C. Moller, T. Bartel, F. Gibaja, K. Lauer // J. Appl. Phys. — 2014. — Vol. 116. — P. 024503.

[16] Dissociation and Formation Kinetics of Iron–Boron Pairs in Silicon after Phosphorus Implantation Gettering / N. Khelifati, H.S. Laine, V. Vahanissi et al. // Phys Status Solidi A. — 2019. — Vol. 216. — P. 1900253.

[17] Фаренбрух, А. Солнечные элементы. Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб. — M.: Энергоатомиздат, 1987. — 280 с.

[18]