МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Особливості функціонування тонкоплівкових фотоприймачів CuS-CdSe** **в залежності від рівня освітленості**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма**: Фізика наносистем

**Кваліфікаційна робота магістра**

Краська Дмитра Олександровича

**Науковий керівник**:

д. ф.-м. н., доцент

Оліх Олег Ярославович

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики

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

Завідувач кафедри проф. Боровий М.О.

Київ – 2021

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

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

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

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

**АНОТАЦІЯ**

**Красько Д.О.** Особливості функціонування тонкоплівкових фотоприймачів CuS-CdSe в залежності від рівня освітленості.

Кваліфікаційна робота магістра за напрямом підготовки Фізика, освітня програма «Фізика наносистем». – 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 Текст Текст Текст Текст Текст

**Ключові слова**: CuS-CdSe, рівень освітлення, дво-діодна модель, УФ

**SUMMARY**

Krasko D.O**.** Features of thin film CuS-CdSe photodetectors operation depending on illumination level

Magistr qualification work in the direction Physics, educational program "Physics of nanosystems". – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of General Physics. – Kyiv – 2021.

**Research supervisor**: Dr. of Physics and Mathematics, as.prof. Olikh O.Y., as.prof. of Department of General Physics.

Text Text Text Text Text Text Text

**Key words**: CuS-CdSe, illumination level, two-diode model, UV

**ЗМІСТ**

Вступ

1. Огляд літератури "S-подібні вольт-амперні характеристики сонячних елементів"

2. Методика експерименту та розрахунків

2.1. Зразки та експериментальна установка

2.2. Еквівалентні електричні схеми фотоперетворювача

3. Результати та їх обговорення

3.1. Вибір раціонального методу метаеврістичної оптимізації при застосуванні дводіодної моделі

3.2. Вплив рівня освітлення на ефективність фотоелектричного перетворення

3.3. Залежності параметрів структури CuS-CdSe від рівня освітлення та температури

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Подальший розвиток…

1. Огляд літератури "S-подібні вольт-амперні характеристики сонячних елементів"

2. Методика експерименту та розрахунків

2.1. Зразки та експериментальна установка

В роботі для досліджень використовувалися тонкоплівкові гетероструктури Cu1.8S-CdSe, призначень для реєстрації ультрафіолетового випромінювання. Шар полікристалічного СdSe товщиною 7 мкм з електронною провідністю та концентрацією носіїв 1015cм-3 був нанесений на сіталову підкладку. На нього у вакуумі осаджувався шар сульфіду міді Cu1.8S товщиною 15 нм з дірковою провідністю та концентрацією носіїв 5⋅1021см-3. Омічні контакти створювалися завдяки напиленню плівки молібдена (товщина100-200 нм, опір 1 Oм/см2). Схема структури представлена на Рис.2.1, а. Структура знаходилася у металевому корпусі з віконцем для проходження випромінювання (Рис.2.1, б).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.2.1 Схема структури Cu1.8S-CdSe (а) та її зовнішній вигляд (б) | |

В роботі проводилося вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) досліджуваних структур як при різних рівнях освітлення, так і в темряві в температурному діапазоні 295-340 К за допомогою експериментальної установки, блок-схема якої представлена на Рис.2.2.

Схема безпосереднього вимірювання ВАХ наведена на Рис.2.3. Джерелом напруги, яка подавалася на зразок слугував ЦАП AD5752. Вимірювання струму проводилося за допомогою датчика INA226, напруга – за допомогою АЦП ADS115.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.2. Схема дослідної установки. 1 – персональний комп’ютер; 2 – мікроконтроллер (ATmega2560); 3 – ПІД контролер; 4 ‑ джерело струму D30-12; 5 – елемент Пельт’є; 6 ‑ датчика температури (HTU21D; 7 – теплопровід; 8 – досліджуваний фотоелектроперетворювач; 9 – світловід; 10 – блок вамірювання ВАХ; 11 – LED (PM2B-1LLE); 12 – термостат (W1209); 13 – блок стабілізації струму живлення; 14 – АЦП. |
| 2  1  3  4  5  6 |
| Рис. 2.3 – Схема блоку вимірювання ВАХ. 1 – досліджувана структура, 2 – джерело напруги, 3, 4 – операційні підсилювачі, 5 – вимірювач струму, 6 – вимірювач напруги |

Освітлення зразка проводилося зі боку Cu1.8S за допомогою світлодіод PM2L-1LLE-SD-U, який випромінює електромагнітні хвилі з довжиною 400±10 нм. Сталість температури LED забезпечувалась за допомогою термостату W1209. Точність виміру температури датчиком термостату складає 0,1°С в діапазоні від -9,9°С до 99,9°С, що дозволило підтримувати температуру PM2L-1LLE-SD-U у необхідному діапазоні (30 градусів за шкалою Цельсію) з точністю ±0,3°С. Зразок та світловипромінюючий елемент були температурно розв’язані: світло з LED потрапляло у світлопровід (оптоволоконний, діаметром 1 см) і лише з нього – на зразок.

Інтенсивність випромінювання LED (а отже і рівень освітленості досліджуваної структури) змінювалась шляхом варіації струму через світлодіод. Відповідно до паспортних даних, світловий потік лінійно залежить від величини прямого струму *I*LED через PM2L-1LLE-SD-U (при *I*LED>30 мА). Струмо-контролюючим елементом у колі живлення LED слугував польовий транзистор, опір якого контролювався величиною напруги на затворі, джерелом якої слугував ЦАП ET1255. Наявність операційного підсилювача та резистора забезпечувала негативний зворотній зв’язок та стійкість системи до випадкових змін зовнішніх параметрів. Схема дозволяє встановлювати необхідне значення струму через LED з точністю та стабільністю в межах 0,01%. В дослідженнях використовувалися значення струму 50, 100, 150, 200 та 250 мА.

Температура зразка контролювалася за допомогою цифрового датчика HTU21D. Зміна температури зразка забезпечувалась системою, яка складалася з елемента Пельт’є та керованого джерела струму D30-06. Термостабілізація досягалася шляхом використання програмно реалізованого пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) контролера, вхідним сигналом якого були покази термодатчика, а вихідний сигнал служив керуючим для джерела струму. Система дозволяла стабілізувати задану температуру зразка з точністю ±0,04°С.

2.2. Еквівалентні електричні схеми фотоперетворювача

Під час попередніх досліджень (проведених під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра) було показано, що для опису ВАХ структур Cu1.8S-CdSe доцільно використовувати різні еквівалентні моделі при описі проходження струму за відсутності освітлення та при його наявності. А саме для темнових ВАХ потрібно використовувати однодіодну модель, а для світлових – дводіодну з увімкненими назустріч діодами. Відповідні схеми представлені на Рис.2.4.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 2.4 – Еквівалентні схеми освітленого (ліворуч) та неосвітленого (праворуч) фотоперетворювача CuS1.8–CdSe. | |

Для апроксимації темнових ВАХ використовувався вираз

, (2.1)

де *І* та *V* – струм через структуру та прикладена до неї напруга, відповідно, *I*0,1 та *n*1 – струм насичення та фактор неідеальності діоду, *R*SH,1, *R*SH,2 – послідовний та паралельний опори, відповідно.

Щодо ВАХ, отриманих при освітленні, то відповідно до [1-3], в цьому випадку доцільно застосовувати наступні вирази:

, (2.2)

де *I*0,2 та *n*2 – струм насичення та фактор неідеальності зустрічного діоду,

, (2.3)

, (2.4)

*I*PH – величина фотоструму,

а функція  (*W* – функція Ламберта) може бути обчислена за допомогою методу послідовних наближень:

, (2.5)

причому

. (2.6)

Саме вирази (2.7-2.6) були використані для апроксимації експериментально отриманих ВАХ структур CuS1.8–CdSe. При цьому величини *I*0,1, *I*0,2, *n*1, *n*2, *R*SH,1, *R*SH,2 та *I*РН виступали у ролі шуканих параметри і використовувався метаеврістичний метод апроксимації, вибір якого обґрунтовано у розділі 3.1.

Крім того, з освітлених ВАХ визначалися такі параметри фотоелектричного перетворення як струм короткого замикання (*I*SC), напруга холостого ходу (*V*OC), максимальна вихідна потужність (*P*MP) та фактор заповнення (*FF =P*MP */ I*SC *V*OC). При цьому продилося нелінійна апроксимація різних ділянок ВАХ за методом, запропонованим в роботі [4].

[1] Origin of the Kink in Current-Density Versus Voltage Curves and Efficiency Enhancement of Polymer-C60 Heterojunction Solar Cells. / F. A. de Castro, J. Heier, F. Nüesch, R. Hany // IEEE Journal of selected topics in quantum electonics. — 2010. — Vol. 16, no.6. — C. 1690-1699.

[2] Romero B. Exact analytical solution of a two diode circuit model for organic solar cells showing S-shape using Lambert W-functions / B. Romero, G. Del Pozo, B. Arredondo// Solar Energy. — 2012. — Vol. 86. — C. 3026- 3029

[3] Roberts K. On calculating of Current-Voltage Charactetristics of Multi-Diode Models for Organic Solar Sells / K. Roberts, S. R. Valluri // arXiv preprint arXiv.– 2015. ‑ 1601.02679.

[4] див файл.

3. Результати та їх обговорення

3.1. Вибір раціонального методу метаеврістичної оптимізації при застосуванні дводіодної моделі

3.2. Вплив рівня освітлення на ефективність фотоелектричного перетворення

Процеси фотоелектричного перетворення в напівпровідникових приймачах суттєво залежать від температури та від рівня освітлення. На Рис.3.1 наведено типовий вигляд ВАХ, отриманих в різних умовах.

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рис. 3.1. ВАХ структури CuS1.8–CdSe, отримані при різних температурах та рівнях освітлення. Температура, К: 295 (а), 300 (б). *I*LED, мА: 50 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5). Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формул (2.2)-(2.6) |

З наведених залежностей видно, що при зростанні температури суттєво зменшується напруга холостого ходу, а підвищення рівня освітленості спричинює зростання струму короткого замикання.

На Рис.3.2 приведено температурні залежності *V*OC. З літератури [3.1] відомо, що для тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів з гетеропереходом температурна залежність напруги холостого ходу має описуватися виразом:

, (3.1)

де *Е*а – активаційна енергія рекомбінаційних процесів, *І00*– температурно незалежний множник у струмі насичення через діод, розташований у прямому напрямі. З рисунка видно, що на експерименті дійсно спостерігається лінійна залежність:

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.2. Температурні залежності напруги холостого ходу структури CuS1.8–CdSe при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація. |

. (3.2)

Визначені з експериментальних залежностей значення  та зведено у Табл.3.1. Порівняння виразів (3.1) та (3.2) показує, що , а  має залежати від струму короткого замикання. Дані Табл.3.1 підтверджують очікувану незалежність активаційної енергія рекомбінаційних процесів (Ea = 0,95 еВ), в той же час як  зменшується з підвищенням рівня освітлення, що можна пов’язати зі зростанням струму короткого замикання.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Табл.3.1. Параметри, визначені з експериментальних температурних залежностей параметрів фотоелектричного перетворення | | | | | | | | |
| *I*LED, мА | , В | , 10-3 В/К | , 10-5 А | , 10-8 А/К | , 10-5 А | , 10-8 А/К | *Т*М,РМР, K | *Т*М,FF, K |
| 50 | 0,95 | 1,70 | 7,7 | 8,0 | 8,1 | 8,5 | 295 | 331 |
| 100 | 0,95 | 1,67 | 14,1 | 7,8 | 14,5 | 6,7 | 301 | 330 |
| 150 | 0,95 | 1,63 | 18,9 | 3,6 | 28,4 | 31 | 309 | 331 |
| 200 | 0,96 | 1,61 | 24,1 | 1,7 | 39,1 | 44 | 311 | 330 |
| 250 | 0,95 | 1,59 | 29,3 | 2,4 | 45 | 42 | 313 | 329 |

На наступному рисунку (Рис.3.3) представлені температурні залежності фотоструму та струму короткого замикання. Величина *I*РН переважає *I*SC, що пов’язано з необхідністю врахування в еквівалентній схемі опорів *R*SH,1 та *R*SH,2 [3.2]:

. (3.3)

Відмінності між ними зростають з підвищенням рівня освітленості та зменшенням температури, що свідчить про несталість величин опорів. Видно, що обидва струми достатньо слабко залежать від температури і ці залежності можна описати лінійними функціями:

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.2. Температурні залежності струму короткого замикання та фотоструму CuS1.8–CdSe при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація. |

, (3.4)

. (3.5)

Визначені величини параметрів відповідно до формул (3.4) та (3.5) наведені в Табл.3.1. Видно, що температурні коефіцієнти струму короткого замикання достатньо малі, в той же час як для фотоструму при збільшенні рівня освітлення залежність від температури підсилюється.

В свою чергу, величина фотоструму може бути визначена наступним чином [3.3]

, (3.6)

де *IPH,lim* ‑ так званий граничний фотострум (optically limited light generated current), величина якого, зокрема, пропорційна потоку падаючих фотонів, *μ* та *τ* – рухливість та час життя носіїв заряду, *VFB* – напруга у наближенні плоских зон, *d* ‑ товщина поглинаючого світло шару напівпровідника. В нашому випадку граничний фотострум пов’язаний з  () і очікується, що ці величини мають біти прямопропорційні ступеню освітленості. Дійсно, така залежність і спостерігається на експерименті – див. Рис.3.4, а. Лінійність наведених на цьому рисунку залежностей також підтверджую, що інтенсивність випромінювання використаного світлодіода дійсно пропорційна струму через нього. В свою чергу, суттєве підсилення температурної залежності фотоструму при високих рівнях освітлення свідчить, що в цьому випадку відбуваються зміни рухливості та/або часу життя носіїв заряду.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 3.3. Залежності температурнонезалежних компонет струму короткого замикання та фотоструму (а) та температур, що відповідають максимальним значенням вихідної потужності та коефіцієнта форми (б) від рівня освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація (а). | |

Температурна залежність максимальної вихідної потужності досліджуваних структур є немонотонною функцією температури – див.Рис.3.4. Причому температура, при якій спостерігається максимальна ефективність фотоелектричного перетворення (*Т*М,РМР) зсувається в бік більших значень при зростанні потоку падаючих фотонів (див. дані Табл.3.1 та Рис.3.3,б).

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.4. Температурні залежності максимальної вихідної потужності структури CuS1.8–CdSe при різних рівнях освітлення. |

Також була розглянута величина відносної вихідної потужності, нормована до інтенсивності освітлення. Відповідна залежність представлена на Рис.3.5. При розрахунках використовувалось значення *P*MP, яке відповідає максимуму температурної залежності. Представлені дані свідчать, що зростання концентрації фотогенерованих носіїв заряду викликає зниження ефективності фотоелектричного перетворення, причому ефект достатньо суттєвий і може досягати 25 %.

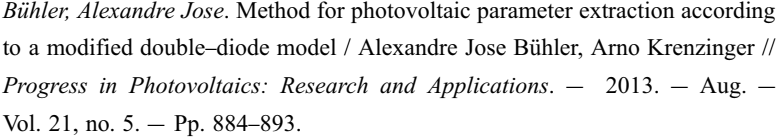
Рис.3.6 наводить ілюструє температурні залежності фактора форми ВАХ. Подібно до випадку вихідної потужності, *FF* також немотонно залежить від температури. Проте, на відміну від згаданого випадку температура, при якій спостерігається найбільше значення фактору форми (*Т*М,FF) практично не залежить від рівня освітленості (див. дані Табл.3.1 та Рис.3.3,б)

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис.3.5. Залежність нормованих вихідної потужності та коефіцієнта форми від інтенсивності освітлення |
|  | |
| Рис. 3.6. Температурні залежності коефіцієнта форми ВАХ структури CuS1.8–CdSe при різних рівнях освітлення. | |

Зауважимо, величина *FF* характеризує відхилення реальної форми ВАХ у четвертому квадранті від ідеалізованої прямокутної, а її зменшення свідчить про зростання втрат фотоприймача. Дані Рис.3.6 свідчать, що внутрішні втрати структури CuS–CdSe зростають при підвищення рівня освітлення. Зрозуміло, що *FF* прямопропорційно залежить від максимальної вихідної потужності, проте, як свідчать дані Рис.3.5, зменшення FF неможливо пояснити лише деградацією величини *P*MP.

[3.1] Kiyoteru Tanaka Takashi Minemoto, Hideyuki Takakura «Analysis of heterointerface recombination by Zn1\_xMgxO for window layer of Cu(In,Ga)Se2 solar cells» // Solar Energy, 2009, v.83, p.477.

[3.2]



[3.3] Steven S. Hegedus, William N. Shafarman «Thin-Film Solar Cells: Device Measurements and Analysis» // Progress in photovoltaics: research and applications, 2004, v.12, p.155

3.3. Залежності параметрів структури CuS-CdSe від рівня освітлення та температури

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.7. Темнові ВАХ структури CuS1.8–CdSe при температурі 295 К (1) та 340 К (2). Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до (2.1). |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 3.8. Температурні залежності струму насичення (а) та фактору неідеальності та тунельного коефіцієнта (б) темнових ВАХ. Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формули (3.). | |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.9. Температурні залежності струму насичення прямого діоду при різних рівнях освітлення. |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Табл.3.2. Активаційні енергії струмів насичення структури CuS1.8–CdSe | | |
| *I*LED, мА | *E*a,I1, меВ | *E*a,I2, меВ | |
| 0 | 1260±30 | - | |
| 50 |  | 643±7 | |
| 100 |  | 618±5 | |
| 150 | 1260±70 | 488±4 | |
| 200 | 1100±200 | 472±6 | |
| 250 | 1500±300 | 442±5 | |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.10. Температурні залежності фактору неідеальності прямого діоду при різних рівнях освітлення. |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.11. Температурні залежності шунтуючого опору прямого діоду при різних рівнях освітлення. |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.12. Температурні залежності струму насичення зворотного діоду при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формули (3.). |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.13. Температурні залежності фактору неідеальності зворотного діоду при різних рівнях освітлення. |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3.14. Температурні залежності шунтуючого опору прямого діоду при різних рівнях освітлення. |

Висновки

Список використаної літератури