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**

**Костина А.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 Текст Текст Текст Текст Текст

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

**SUMMARY**

Kostyna A. R**.** Influence of iron-boron complex rebuildingon photoelectric parameters of silicon solar cells

Bachelor qualification work in the direction Physics, specialization «Physics of nanostrucrures in metals and ceramics». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of General Physics. – Kyiv – 2021.

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

Text Text TextText Text Text Text

**Key words**: solar cell, silicon, FeB pair, current-voltage characteristic

**ЗМІСТ**

ВСТУП……………………………………………………………………………….3

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ……………………………………………….....4

1.1 Основні характеристики сонячних елементів…………………………..4

1.2 Основні властивості домішкової пари FeB в кремнії……………..……8

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

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

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

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

3.1 Дифузійний струм...…………………………………………………….17 3.2 Рекомбінаційний струм …………………………………………………21

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

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

Вступ

Подальший розвиток…

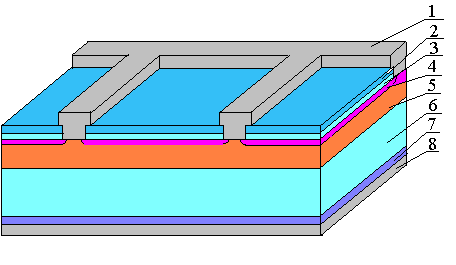
1. Огляд ЛІТЕРАТурИ

1.1. Структура сонячного елементу

**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 марки КДБ-10 (кремній дірковий легований бором з питомим опором 10 Ом⋅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 SiO2 товщиною 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 - фронтальний металевий електрод; 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, device under testing) 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-аналогово перетворювача 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, в установці 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 приблизно 25 мкм і 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 (light emission diod) 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 джерела світла низької інтенсивності. 1 – LED (SN-HPIR940nm-1W), 2 – блок стабілізації температури, 3 – блок стабілізації струму живлення, 4 – живлення діоду (12 В), 5 – сигнал з цифро-аналогового перетворювача. |

Друге джерело світла, високо інтенсивне, призначене для дисоціації дефектних комплексів, пов’язаних з залізом. З літератури [1,2] відомо, що подібний результат може бути досягнутий з використанням галогенових джерел світла. У роботі випромінюючим елементом є галогенова лампа потужністю 200 Вт.

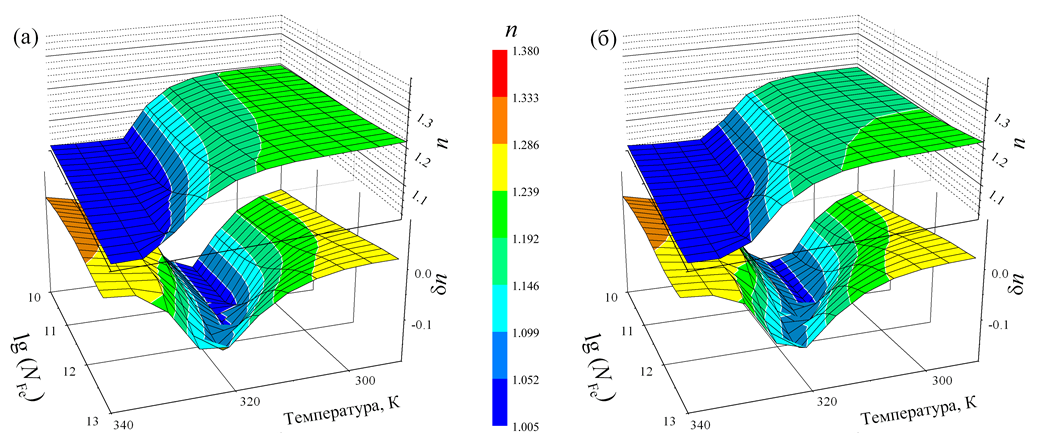
У зв’язку з необхідністю швидких змін джерела освітлення сонячного елементу (низькоінтенсивне з використанням HLX-P8B1WPWC-02D для вимірювання світлових вольт-амперних характеристик та високоінтенсивне, на основі галогенової лампи) був розроблений спеціальний блок з використанням оптоволоконного світловоду.

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.

1.Macdonald D. Measuring dopant concentrations in compensated p-type crystalline silicon via iron-acceptor pairing / D. Macdonald, A. Cuevas, L.J. Geerligs // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – P. 202119.

2. Geerligs L.J. Dynamics of light-induced FeB pair dissociation in crystalline silicon / L.J. Geerligs, D. Macdonald // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85. – P. 5227‑5229.

3.Вплив параметрів структури на величину фактора неідельності



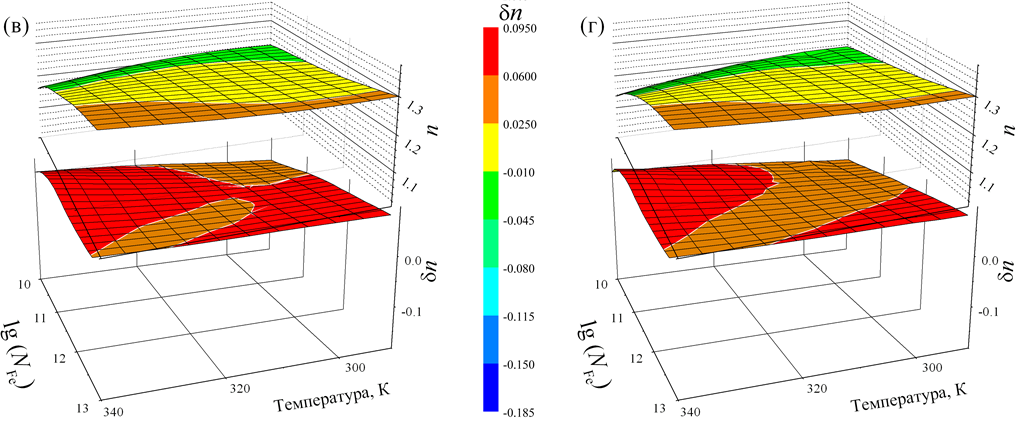


Рис.3.1. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від концентрації заліза та температури. , : (а,б), (в,г); (а,в), (б,г).

Як вже зазначалося вище, в роботі проводилися розрахунки як для рівноважного випадку (переважна кількість домішкового заліза утворила пари з атомами бору, незначна частина у неспареному міжвузольному стані), так і для ситуації, коли атоми всі атоми є неспареними (реалізується після освітлення структури). У представлених результатах використовуються наступні позначення:

‑ фактор неідеальності для структури в рівновазі;

– різниця між факторами неідеальності структури після освітлення та у рівноважному стані.

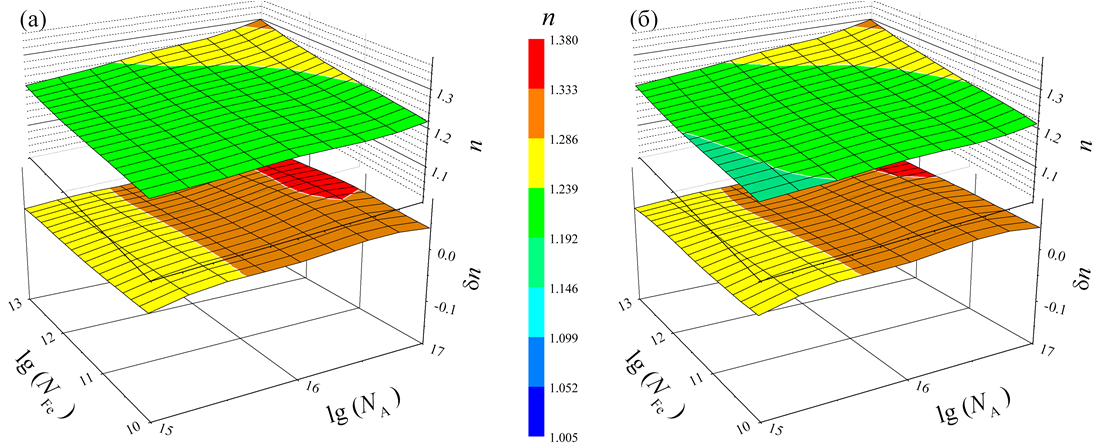
Отримані результати узагальнено на рисунках 3.1-3.6. Всі вони схожі за структурою, а саме кожна частина містить два зображення, верхнє з яких відображає залежності , а нижнє ‑. Вплив окремих параметрів структури проаналізовано окремо, проте подібним чином розділяти рисунки є недоцільним.

3.1Вплив товщини бази

Проведені дослідження показали, що товщина бази не є визначальним параметром для фактору неідеальності кремнієвих структур .Зокрема, величина фактично не впливає на характери залежності від концентрацій бору, заліза та температури – в цьому можна переконатися порівнюючи між собою частини (а) та (б) і частини (в) та (г) рисунків 3.1, 3.2 та 3.3.

Водночас, збільшення товщини бази сонячного елемента викликає певне зменшення абсолютного значення фактору неідеальності і цей ефект зростає при зменшенні концентрацій заліза та бору – див. Рис.3.4 (а) та (б), Рис.3.5 (а) та Рис.3.6 (а), (в), (д).

На нашу думку, причини цього ефекту наступні. Фактор неідеальності пов’язаний з рекомбінаційними процесами, що відбуваються переважно в області просторового заряду, причому просторовим параметром, що характеризує цей процес є і довжина дифузії неосновних носіїв заряду. Проте останнє перестає бути справедливим, якщо товщина бази структури стає меншою, ніж довжина дифузії електронів , так як у цьому випадку саме геометричний параметр стає регулюючим фактором. В той же час при вплив товщини бази на *n* має бути мінімальним.



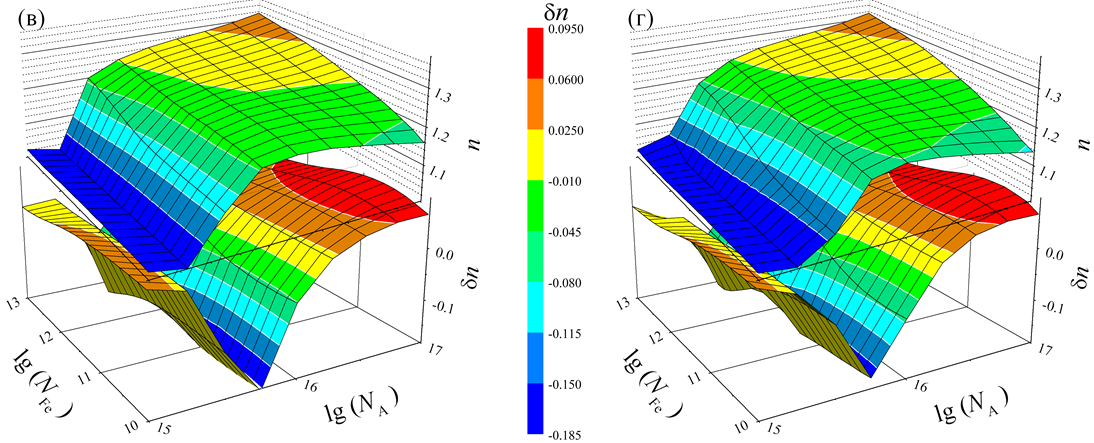
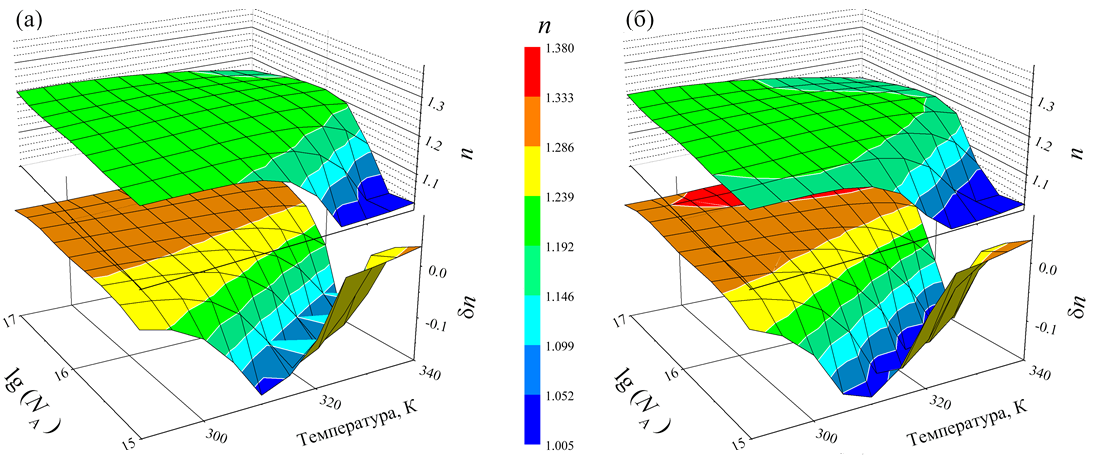


Рис.3.2. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від концентрацій заліза та бору. (а,б), (в,г); , (а,в), (б,г).

З метою перевірки гіпотези за допомогою програмного пакету SCAPS розраховано величину довжини дифузії в базі у наближення наявності лише міжвузольних атомів заліза. Результати представлені на рис.3.7.



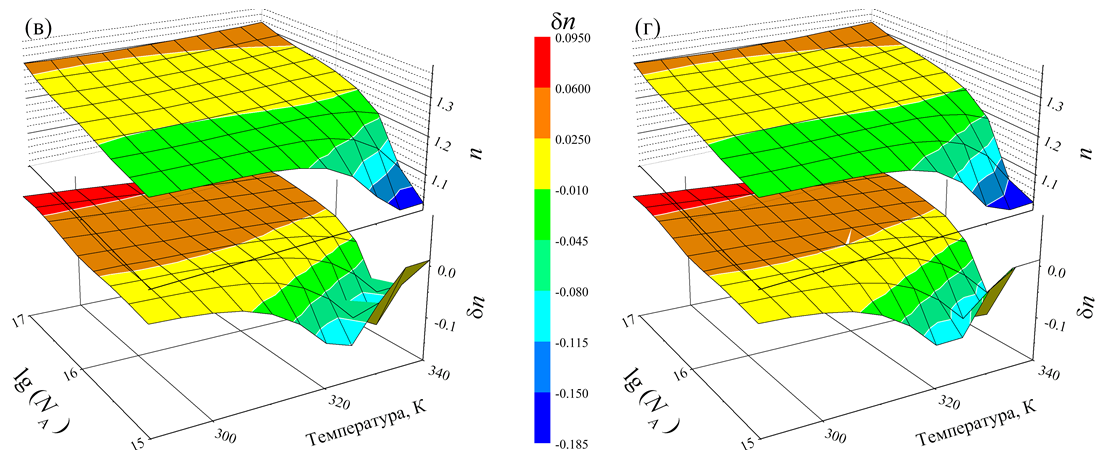


Рис.3.3. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від концентрації бору та температури. , : (а,б), (в,г); , (а,в), (б,г).

Видно, що дійсно, зменшення величин та викликає збільшення довжини дифузії, тоді як від температури залежність досить слабка. Крім того, у дослідженому діапазоні параметрів спостерігається перехід від умови до << , що і зумовлює виявлені особливості залежностей .

3.2Вплив температури

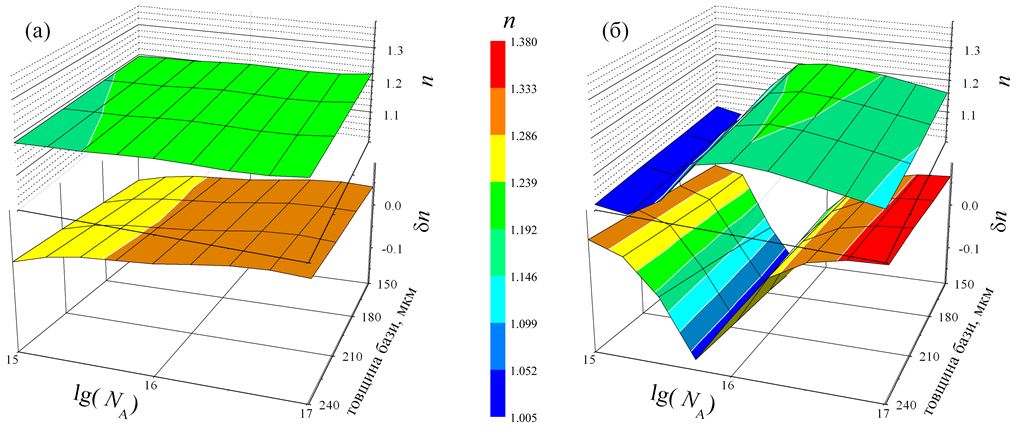
Як видно з представлених графіків, температура суттєво впливає як на величину самого фактору неідеальності, так і на його залежність від концентрації легуючої домішки. Так, зі зростанням температури зменшується – рис.3.1, 3.3 та 3.5. Цей ефект підсилюється при малих значеннях , що ілюструє, наприклад, порівняння рисунків 3.1 (а) та (в) і 3.5 (б) та (е) попарно чи безпосередньо рисунок 3.3. Зменшення концентрації заліза також підсилює температурну залежність фактору неідеальності (рис.3.1 (в), 3.5), хоча цей параметр є менш впливовим, ніж .

При зростанні температури спостерігається також інтенсифікація залежностей досліджуваного параметру від концентрації легуючої домішки та домішкового залізу, що яскраво ілюструється рисунками 3.2, 3.4 та 3.6.

При аналізі температурних залежностей необхідно врахувати, що ефективність рекомбінації за участю рівня дефекту залежить від ймовірності його заповнення. Відповідно до статистики Фермі-Дірака, ймовірність знаходження дірки на рівні дефектувизначається виразом

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1) |
|  |  |

В нашому випадку відповідає рівням та пари . Положення рівня Фермі, в свою чергу, визначається температурою та рівнем легування. Так, у не виродженому напівпровіднику p-типу за умови повної іонізації акцепторів (а саме цей варіант реалізується у наших умовах)



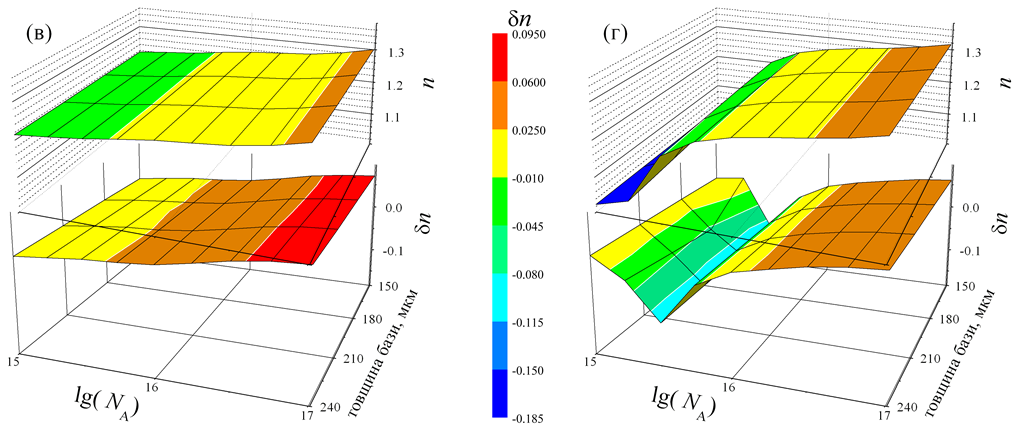
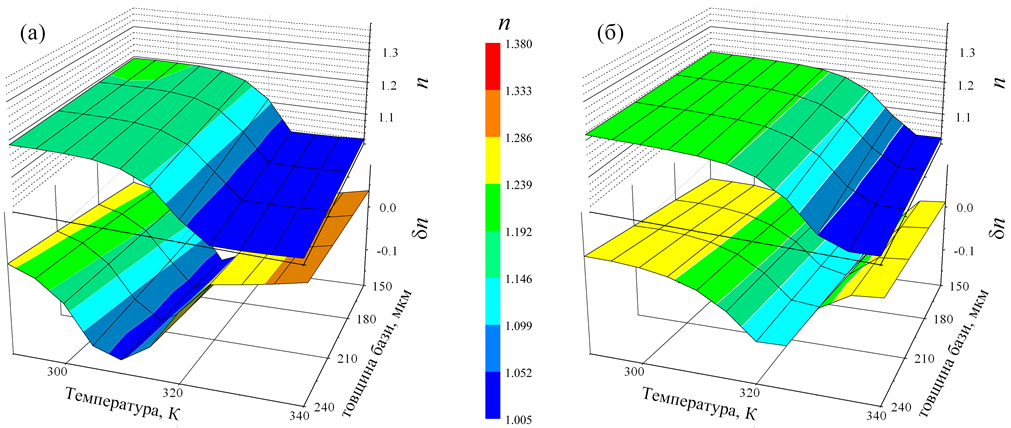
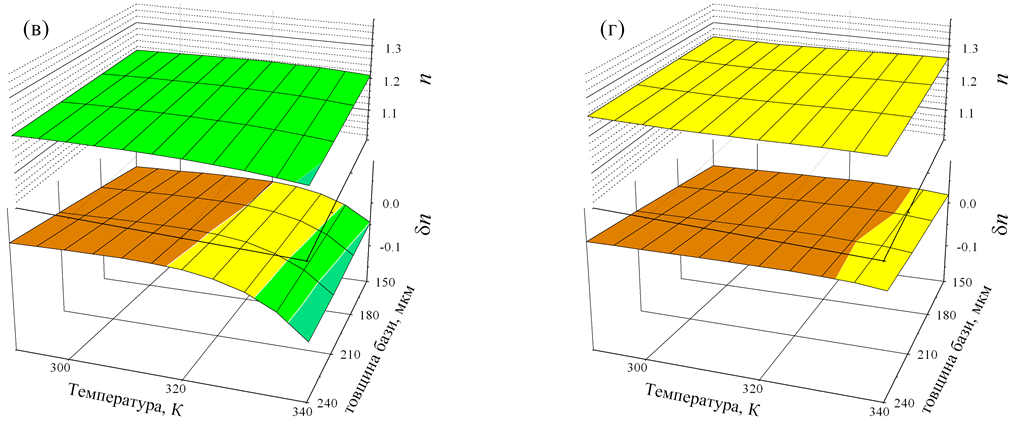


Рис.3.4. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від концентрації бору та товщини бази. , : (а,б), (в,г); (а,в), (б,г)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2) |
|  |  |

де *NV* – ефективна густина рівнів біля дна зони провідності.





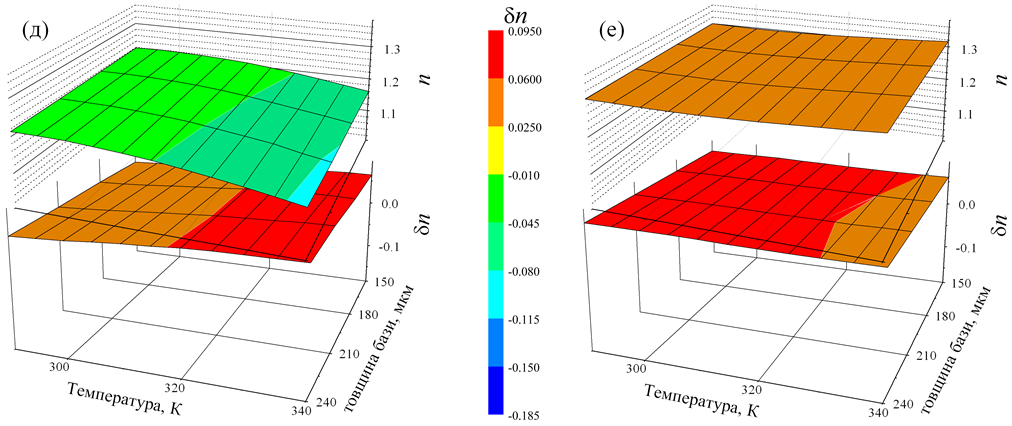
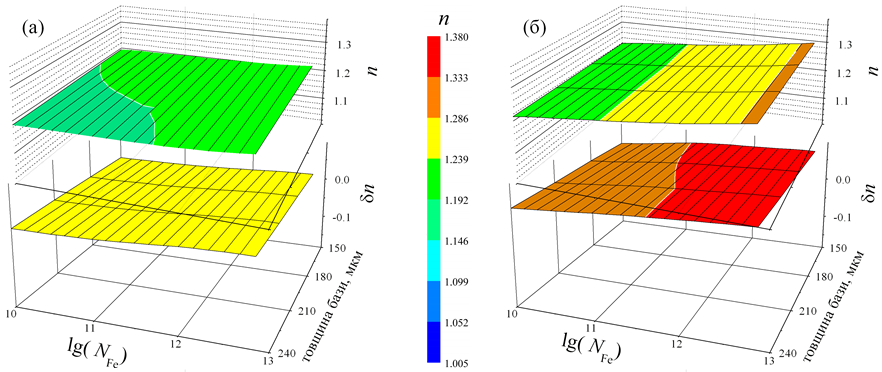
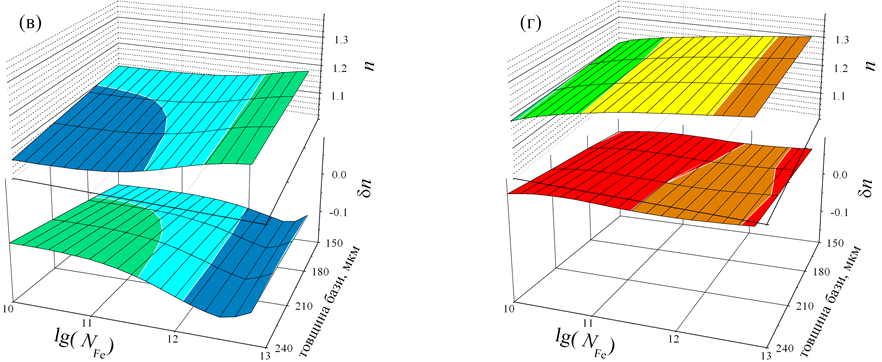


Рис.3.5. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від температури та товщини бази.,: (а,в,д), (б,г,е); , : (а,б), (в,г) , (д,е).





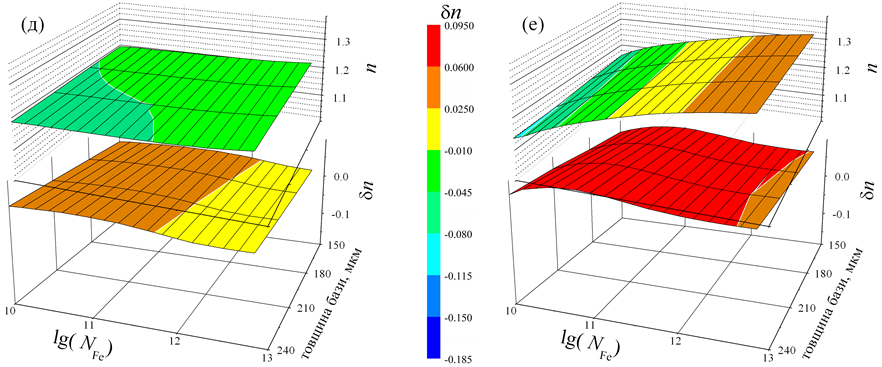


Рис.3.6. Залежність величини фактору неідеальності в рівноважному стані (верхні залежності в кожній частині) та зміни фактору неідеальності після освітлення (нижні залежності в кожній частині) від концентрації заліза та товщини бази. *N*А, см-3: 1015 (а,в,д), 1017 (б,г,е); *T*, K: 290 (а,б), 320 (в,г) , 340 (д,е).

Як показано раніше [59], температурна залежність *fp* подібна до тієї, що спостерігається для фактору неідеальності і тому, на нашу думку, саме ймовірність заповнення рівня визначає виявлену залежність *n*(*T*).

Зауважимо, що залежність типу (3.2.1) відповідає функції, яка достатньо повільно змінюється у всій області зміни аргументу за винятком достатньо

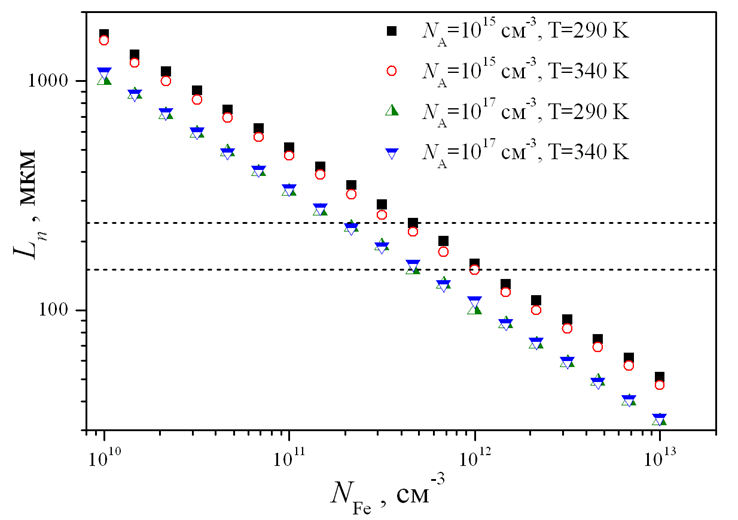


Рис.3.7. Залежність довжини дифузії електронів у базі структури від концентрації міжвузольних атомів заліза. Штриховими лініями виділено діапазон товщин бази, використаних в роботі.

інтервалу. У випадку, коли параметри зразка відповідають цьому інтервалу, спостерігаються швидкі зміни фактора неідеальності. Проте умови потрапляння у цей інтервал змінюються після дисоціації пар . Як наслідок, у випадку швидких змін *n* виявляються немонотонні залежності – див. рис.3.1 (а), (б), 3.3 та 3.5 (а), (б).

3.3Вплив рівня легування

Рівень легування бази є, поряд з температурою, визначальним фактором розташування рівня Фермі, а, отже, і ймовірності заповнення рівня дефекту. Тому пара параметрів (, , ) є взаємодоповнюючою у впливі на величину фактору неідеальності.

У випадку високих температур (близько ) при підвищенні значення спостерігається зростання величини *n*, яке характеризується у більшості випадків достатньо швидким насиченням – рис.3.2, 3.3, 3.4. У випадку низьких концентрацій рекомбінаційних центрів () виявлена немонотонність залежності – рис.3.2 (в) та (г). З рис.3.2, 3.3, 3.4. також видно, що при кімнатних температурах () величина фактору неідеальності практично не залежить від концентрації легуючої домішки.

Величина є визначальною для можливості спостереження залежностей від інших параметрів. Наприклад, температурна залежність є суттєвою при (рис.3.1 (а) та (б), 3.5 (а) та (б)), тоді як при вона практично не спостерігається – рис.3.1(в) та (г), 3.5 (д) та (е). Навпаки, залежність фактору неідеальності від концентрації домішкового заліза підсилюється при збільшенні концентрації бору – рис.3.6.

Рівень легування також є тим параметром, який дозволяє «налаштувати» систему до стану, коли розпад пар залізо-бор суттєво змінює величину фактору неідеальності. Про це свідчать немонотонні залежності , які спостерігаються на рис.3.2, 3.3, 3.4.

3.5Вплив кількості домішкового заліза

Як показано в роботі [64], величину фактора неідеальності можна використати для оцінки концентрації домішкового заліза. Зрозуміло, що найсприятливіша з цієї точки зору ситуація реалізується в тому випадку, якщо співвідношення між та описується монотонною функцією з великим значенням похідної.

Як видно з рис. 3.1, 3.2 та 3.6, при зростанні концентрації заліза фактор неідеальності монотонно зростає. Це цілком зрозуміло, так як при збільшенні концентрації рекомбінаційних центрів інтенсифікуються рекомбінаційні процеси. Проте залежність достатньо слабка, особливо при – рис.3.1 (а), (б). Збільшення концентрації легуючої домішки покращує ситуацію з точки зору збільшення кутового нахилу залежності – рис.3.1 (в), (г). Також цьому сприяє підвищення температури – чи не найкращою ілюстрацією є рис.3.6.

Подібно до товщини бази, концентрація заліза суттєво не впливає за залежності фактору неідеальності від інших параметрів – рис.3.3, 3.4 та 3.5.

Іншим показником, який можна використати для оцінки є зміна фактору неідеальності після світло-індукованого розпаду пар. Зокрема, класичний підхід для вирішення подібного завдання полягає у порівнянні часу життя неосновних носіїв заряду до та після освітлення кремнієвих пластин. Проведені розрахунки (рис. 3.1, 3.2 та 3.6) показують, що характер залежності не постійний:

* при та зростання викликає збільшення , причому залежність більш яскраво проявляється при низьких концентраціях бору;
* при та збільшуються одночасно, хоча дана залежність достатньо слабка і підсилюється лише при ;
* при та високих температурах при великих концентраціях заліза набуває від’ємних значень, зменшуючись за модулем при зростанні .

Різноманіття виявлених залежностей свідчить, на нашу думку, що метод визначення концентрації заліза може ґрунтуватися на сумісному використанні значень та , причому взаємозв’язок цих параметрів з доцільно шукати не аналітично, а з використанням нейронних мереж.

висновки

1. Проведено розрахунки величини фактору неідеальності кремнієвих кристалічних структур з домішкою заліза та базою товщиною у температурному діапазоні для концентрацій легуючої домішки та заліза .
2. Показано, що товщина бази впливає на величину фактору неідеальності у випадку, коли вона набагато менша довжини дифузії неосновних носіїв заряду, вплив температури та рівня легування переважно пов’язаний зі зміною ймовірності заселеності рекомбінаційного рівня, а залежність від концентрації заліза є монотонною функцією.
3. Виявлено, що зміна величини фактору неідеальності після розпаду пар має різний знак залежно від температури та рівня легування.

список використаної літератури

1. [WWF] – World Wild Fund for Nature International / Living Planet Report 2014: species and spaces people and place, WWF, Zoological Society of London, Global Footprint Network, Water Footprint Network, Gland // 2014.
2. [EWG] – Energy Watch Group / *Fossil and Nuclear Fuels – The Supply Outlook //* Berlin. - 2013.
3. [REN21] – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century / Renewables 2016 – Global Status Report // Paris. – 2016. - [www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\_2016\_Full\_Report\_REN21.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf).
4. [BNEF] – Bloomberg New Energy Finance /*New Energy Outlook 2015 //*London. - 2015. - Jun. - 23.
5. [IEA] – International Energy Agency / *World Energy Outlook 2016* // Paris. – 2016. -[www.worldenergyoutlook.org/](http://www.worldenergyoutlook.org/).
6. [EWG] – Energy Watch Group / IEA creates misleading future scenarios for solar power generation // Berlin. – 2015. – Nov. – 27. - <http://energywatchgroup.org/iea-creates-misleading-future-scenarios-solar-power-generation/>.
7. [IEA-PVPS] – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme / Snapshot of Global PV Markets 2015 // St. Ursen. – 2016. - [www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS\_A\_Snapshot\_of\_Global\_PV\_-\_1992-2015\_-\_Final.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf).
8. PV Market Alliance / The PV market alliance forecasts a growing global PV market exceeding 60 GW in 2016 and 70 GW in 2017 // Hong Kong, Brussels, Madrid, Tokyo, San José. - 2016. – Jun. – 16. - <http://pvmarketalliance.biz/>.
9. [SEPA] – Solar Electric Power Association / Utility solar market snapshot – Sustained growth on 2014 // Washington. – 2015. – May. - [www.solarelectricpower.org/media/322918/solar-market-snapshot-2014.pdf](http://www.solarelectricpower.org/media/322918/solar-market-snapshot-2014.pdf).
10. pv-magazine / Mexico awards more than 1 GW of solar at US$40.50/MWh // Berlin. 2016. – Mar. – 30. - [www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/mexico-awards-more-than-1-gw-of-solar-at-us4050-mwh\_100023944/#axzz4BIYC8nq7](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/mexico-awards-more-than-1-gw-of-solar-at-us4050-mwh_100023944/#axzz4BIYC8nq7).
11. pv-magazine / Peru awards 185 MW of solar PV at US48/MWh // Berlin. – 2016. – Feb. – 17. - [www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/peru-awards-185-mw-of-solar-pv-at-us48-mvh\_100023273/#axzz4BIYC8nq7](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/peru-awards-185-mw-of-solar-pv-at-us48-mvh_100023273/#axzz4BIYC8nq7).
12. pv-magazine / Third phase of Dubai`s DEWA solar project attracts record low bid of US 2.99 cents/kWh // Berlin. – 2016. – May. – 2. - [www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/third-phase-of-dubais-dewa-solar-project-attracts-record-low-bid-of-us-299-cents-kwh\_100024383/#axzz4BIYC8nq7](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/third-phase-of-dubais-dewa-solar-project-attracts-record-low-bid-of-us-299-cents-kwh_100024383/#axzz4BIYC8nq7).
13. *M. Metayer, Ch. Breyer, H. J. Fell*/ The projections for the future and quality in the past of the world energy outlook for solar PV and other renewable energy technologies// Hamburg. - 2015. – Sep. –Pp. 14-18. – 2015. - <http://bit.ly/2izWUUJ>
14. [UNFCCC] – United Nations Framework Convention on Climate Change // *Adoption of the Paris Agreement – Proposal by the President*. - Paris. - 2015. - <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109.pdf>
15. *A. Gerlach, Ch. Breyer, M. Fisher, Ch. Werner*/ Forecast of long-term PV installations – Discussion of scenarios ranging from IEA to the solar economy // Hamburg. - 2015. – Sep. –Pp. 14-18. - <http://bit.ly/2ily900>
16. *C. Breyer, S. Heinonen, J. Ruotsalainen*/ New consciousness: a societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. // *Technological Forecasting and Social Change.* – 2017. -Vol. 114. - Pp. 7-15.
17. Основи технології виробництва кремнієвих сонячних фотоперетворювачів /*Avenston* . - 2017. – Лис. –26. -[https://avenston.com/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells](https://avenston.com/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells/).
18. *D. Macdonald, A. Cuevas, A. Kinomura, Y. Nakana*/ Phosphorus gettering in multicrystalline silicon studied by neutron activation analysis // *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. - New Orleans. – 2002. – Pp. 285-288.
19. *A. A. Istratov, T. Buonassisi, R. J. MacDonald, A. R. Smith, R. Schindler, J. A. Rand, J. Kalejs, E. R. Weber*/ Neutron activation analysis study of metal content of multicrystalline silicon for cost-efficient solar cells // *Proceedings of the 13th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes*. – 2003. – Pp. 158-161.
20. A. A. Istratov, H. Hieslmair, E. R. Weber / Iron and its complexes in silicon // J. *Appl. Phys. –* 1999. – Vol. 69. – Pp. 13-44.
21. *L. C. Kimerling, J. L.*/ Benton Electronically controlled reactions of interstitial iron in silicon // *Phys. B.* – 1983. – Vol. 116. – Pp. 297-300.
22. *O. Breitenstein* / Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering in homogeneous current distributions // *Opto-Electron. Rev*. – 2013. – Vol. 21. – No. 3. – Pp. 259-282.
23. *M. Sze. Simon, K. Ng. Kwok*/ Physics of Semiconductor devices // Wiley-Interscience. – 2006. – Oct. – 27.
24. *Shockley W.* / The theory of p-n junction in semiconductors and p-n junction transistors // *Bell Syst. Tec. J.* – 1949. – Jul. – Vol. 28. – Pp. 435-489.
25. <http://pveducation.org/pvcdrom>
26. *M. Sze. Simon, K. Ng. Kwok*/ Physics of Semiconductor devices / // Wiley-Interscience. – 2006. – Oct. – 27.
27. *R. Kuhn, P. Fath, E. Bucher*/ Effects of pn-junctions bordering on surfaces investigated by means of 2D-modeling // Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No.00CH37036). – 2000. – Pp. 116-119. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2000.915768>
28. *J. Beier, B. Voss*/ Humps in dark I-V-curves-analysis and explanation // Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1993 (Cat. No.93CH3283-9) – 1993. – Pp. 321-326. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.1993.347163>
29. K. McIntosh, P. Altermatt, G. Heiser / Depletion-region recombination in silicon solar cells. When does mdr = 2? // 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceedings of the International Conference and Exhibiton. – 2000. – Pp. 250-253.
30. *A. Kaminski, J. J. Marchand, H. El Omari, A. Laugier, Q. N. Le, D. Sarti* / Conduction processes in silicon solar cells // Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference.– 1996. – Pp. 573-576. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.1996.564071>
31. *Z. Hameiri, K. McIntosh, G. Xu*/ Evaluation of recombination processes using the local ideality factor of carrier lifetime measurements // *Sol. Energy Mater Sol. Cells.* – 2013. – Pp. 251-258. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.040>
32. *A. S. H. van der Heide, A. Schonecker, J. H. Bultman, W. C. Sinke*/ Explanation of high solar cell diode factors by nonuniform contact resistance // *Res. Appl. 13.* – 2005. – Pp. 3-16. – <http://dx.doi.org/10.1002/pip.556>
33. *I. Duan, H. Yi, C. Xu, M. B. Mahmud, D. Wang, F. H. Shabab, A. Uddin* / Relationship between the diode ideality factor and the Carrier recombination resistance in organic solar cells // *J. Photovolt 8.* – 2018. – Pp. 1701-1709. – <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870722>.
34. *A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verschraegen, S. Degrave*/ SCAPS manual // 2013. – Sep. – 2. - <https://users.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/projects/scaps/SCAPS%20Manual%202%20september%202013.pdf>
35. *E. T. Hu, G. Q. Yue, R. J. Zhang, Y. X. Zheng, L. Y. Chen, S. Y. Wang* / Numerical simulations of multilevel impurity photovoltaic effect in the sulfur doped crystalline silicon // *Renewable Energ.* – 2015. – May. – Vol. 77. –P.p 442-446. -<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.049>
36. *Abdelghani Hamache, Nouredine Sengouga, Afak Meftah, Mohamed Henini* / Modeling the effect of 1 MeV electron irradiation on the performance of nþ–p–pþ silicon space solar cells //*Radiation Physics and Chemistry.* – 2016. – June. - Vol. 123. – Pp. 103–108. -<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.025>
37. *Ghania Azzouzi, Wahiba Tazibt* / Improving silicon solar cell efficiency by using the impurity photovoltaic effect //*Energy Procedi.* – 2013. – Vol. 41. –Pp. 40 – 49. -<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.09.005>
38. *T. Markvart, L. Castaner* / Practical handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications // *Elsevier.* – 2003. – Nov. – 13.
39. *R. Passler* / Dispersion-related description of temperature dependencies of band gaps in semiconductors //*Phys. Rev. B.*– 2002. – Aug. – 5. – Vol. 66. –085201. - <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.085201>
40. *Di Yana, A. Cuevas* / Empirical determination of the energy band gap narrowing in p+ silicon heavily doped with boron //*J. Appl. Phys*.– 2014. – Nov. – 19. – Vol. 116. – 194505. -<http://dx.doi.org/10.1063/1.4902066>
41. *M. A. Green* / Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon // *J. Appl. Phys*. – 1990. – Mar. – 15. – Vol. 67. – No. 6. – Pp. 2944-2954.
42. *R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti* / Reassessment of the intrinsic carrier density temperature dependence in crystalline silicon //*J. Appl. Phys*. – 2014. – Feb. – Vol. 115. – 093705. -http://dx.doi.org/10.1063/1.4867776
43. *D. B. M. Klaassen* / A unified mobility model for device simulation-- I. Model equations and сoncentration dependence*// Solid-State Electronics*. – 1992. - Vol. 35. -No.7. - Pp. 953- 959.
44. *R. Hull* / Properties of Crystalline Silicon // INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. – 1999. – Pp. 1042 - ISBN-10: 0852969333, ISBN-13: 978-0852969335.
45. *W.C. O'Mara, R.B. Herring, L.P. Hant* / Handbook of semiconductor silicon technology //*Noyes Publications*. – 1990. – Pp. 795. -ISBN: 9780815512370.
46. *T. Hieu, T. Nguyen, C. Baker-Finch. Simeon, D. Macdonald* / Temperature dependence of the radiative recombination coefficient in crystalline silicon from spectral photoluminescence // *Appl. Phys. Lett*. – 2014. - Vol. 104. 112105. - http://dx.doi.org/10.1063/1.4869295
47. *P. Pietro, P. Altermatt, Jan Schmidt, G. Heiser, Armin G. Aberle* / Assessment and parameterisation of Coulomb-enhanced Auger recombination coefﬁcients in lowly injected crystalline silicon //*J. Appl. Phys*. – 1997. – Nov. – 15. – Vol. 82, no. 10. - Pp.4938-4944.
48. *S. Rein, S. W. Glunz* / Electronic properties of interstitial iron and iron-boron pairs determined by means of advanced lifetime spectroscopy // J. Appl. Phys. – 2005. – Dec. – 15. – Vol. 98. – 113711. - <https://doi.org/10.1063/1.2106017>
49. *J. D. Murphy, K. Bothe, M. Olmo, V. V. Voronkov, J. Falster* / The effect of oxide precipitates on minority carrier lifetime in p-type silicon // J. Appl. Physics. – 2011. – Sep. – 13. – Vol. 110. – 053713. -<https://doi.org/10.1063/1.3632067>
50. *H. Kohno, H. Hieslmair, A. A. Istratov, E. V. Weber* / Temperature dependence of the iron donor level in silicon at device processing temperatures // *Appl. Phys. Lett*. – 2000. – May. – 8. – Vol. 76. – No. 19. – Pp. 2734-2736.
51. *W. Wijaranajula* / The reaction kinetics of iron-boron pair formation and dissociation in p-type silicon // *J. Electrochem. Soc*. – 1993. – Jan. – Vol. – 140. – No. 1. – Pp. 275-281.
52. *F. E. Rougieux, Chang Sun, D. Macdonal* / Determining the charge states and capture mechanisms of defects in silicon through 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>
53. *B. Paudyal, K. Mcintosh, D. Macdonald* / Tempreature dependent electron and hole capture cross sections of iron-contaminated boron-doped silicon // in: Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). – 2009. - Pp.1588–1593. - <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411380>
54. *A. A. Istratov, H. Hieslmair, E. R. Weber* / Iron and its complexes in sililcon // Appl. Phys. A. – 1999. – May. – 26. – Vol. 69. – Pp. 13-44.
55. *M. Sanati, N. Gonzalez Szwacki, S. K. Estreicher* / Interstitial Fe in Si and its interactions with hydrogen and shallow dopants // Physical Review B. – 2007. – Sept. – 11. – Vol. 76. – 125204.
56. *U.* *[Nærland,](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217342923?via%3Dihub" \l "!) Simone Bernardini, N. Stoddard, E. Good, A. Augusto, M. Bertoni* / Comparison of iron-related recombination centers in boron, gallium, and indium doped silicon analyzed by defect parameter contour mapping // *Energy Procedia*. –2017. – Sep. – Vol. 124. – Pp. 138-145.
57. *S. Sakauchi, M. Suezawa, K. Sumino* / Recombination-enhanced Fe atom jump between the first and the second neighbor site of Fe-acceptor pair in Si // *J. Appl. Phys*. – 1996. – Dec. – 1. – Vol. 80. – No. 11. – Pp. 6198-6203.
58. *Jan. Schmidt /*/ Effect of Dissociation of Iron-Boron Pairs in Crystalline Silicon on Solar Cell Properties / *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. – 2005. – Jun. – Vol. 13, no. 4. – Pp. 325-331.
59. *Olikh O.Ya.*/ Relationship between the ideality factor and the iron concentration in silicon solar cells // [*Superlattices and Microstructures*](https://www.sciencedirect.com/science/journal/07496036)*, 2019*. – 2019. -Vol.136. – 106309. - https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.106309
60. *А.В. Саченко, В.П. Костылев, А.В. Бобыль, В.Н. Власюк, И.О. Соколовский, Г.А. Коноплев, Е.И. Теруков, М.З. Шварц, М.А. Евстигнеев* / Влияниетолщиныбазынаэффективностьфотопреобразованиятекстурированныхсолнечныхэлементовнаосновекремния //*Письма в ЖТФ*. – 2018. - том 44. - вып. 19. - с.40-49. -https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.19.46681.17362
61. *Jan Schmidt* / Effect of Dissociation of Iron-Boron Pairs in Crystalline Silicon on Solar Cell Properties // *Prog. Photovolt: Res. Appl.* – 2005. – Vol. 13. – Pp. 325-331.
62. *С. Wim, C. Sinke*/ Development of photovoltaic technologies for global impact // *Renewable Energy.* – 2019. – Vol. 138. -Pp.911-914. -<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.030>
63. *N. Karaboga, S. Kockanat, ·H. Dogan*/ The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modiﬁed artiﬁcial bee colony // Appl. Intell. – 2013. - Vol. 38. – Pp. 279–288.0