

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Бабиченко Оксани Юріївни

### **«Фотоелектричні властивості структур кристалічного кремнію з гідрогенізованими нанорозмірними вкрапленнями»,**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**Актуальність теми.** Дисертацію присвячено проблемам підвищення ефективності сонячних елементів за рахунок застосування нового класу напівпровідникових матеріалів, фундаментальні властивості яких визначаються гетерокомпозиціями з тонкими і надтонкими структурами, їх геометричними розмірами і характером розподілу домішок. Обраний здобувачем напрямок - сонячна фотоенергетика - є на сьогоднішній день одним з найбільш актуальних для розвитку відтворюваних джерел енергії. У найближчому майбутньому сонячна енергія може стати головним джерелом енергії на Землі. Основним матеріалом для виробництва сонячних елементів (СЕ) є кремній в різних його кристалічних станах (монокристалічний, аморфний, полікристалічний, мікро- і нанокристалічний, поруватий). СЕ на основі кожного з зазначених станів кремнію мають як позитивні, так і негативні сторони, що обмежують їх ефективність. Застосування в одній структурі комбінованації декількох станів дозволяє об'єднати позитивні якості і частково або повністю компенсувати властивості, що обмежують підвищення ефективності перетворення у всьому спектральному діапазоні. Перспективними в розвитку даного напрямку є структури типу кристалічний/аморфний кремній, зокрема найбільшу ефективність - 26,7% на сьогодні мають так звані НІТ СЕ - на основі гетероструктур аморфний/кристалічний кремній. Дослідження впливу геометричних розмірів структурних елементів і їх ступеня аморфізації на процеси фотогенерації носіїв заряду, що безпосередньо впливають на ефективність перетворення сонячного випромінювання, є **актуальним напрямком досліджень.**

Дисертаційна робота Бабиченко О. Ю. складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 139 сторінок, з них 106 сторінок основного тексту. Список використаних джерел на 9 сторінках включає 96 найменувань. Всього в дисертації 47 рисунків та 4 таблиці.

Перший розділ роботи носить оглядовий характер - автор послідовно описує існуючі конструктивно-технологічні особливості сучасних СЕ та технології отримання аморфного кремнію, котрі забезпечують отримання максимальної ефективності фотоперетворення. Сформульовано основні переваги, недоліки і обмеження щодо застосування описаних конструктивних рішень. Особливу увагу в розділі приділено аморфному гідрогенізованому кремнію і його ролі в розвитку сонячної фотоенергетики. На основі проведеного аналізу літературних джерел дисертант визначає питання, які ще не знайшли вирішення на початок дисертаційної роботи і формулює мету роботи – отримання нових даних про властивості гетероморфних напівпровідникових матеріалів на основі кристалічного та аморфного кремнію різного виду та ступеню аморфізації, суттєвих з точки зору їх застосування у фотоелектричних перетворювачах для сонячної енергетики.

Другий розділ присвячено моделюванню впливу ступеню аморфізації аморфного кремнію на розподіл щільності електронних станів. Автором було введено поняття «розупорядкованості» структури та запропоновано його кількісну інтерпретацію, що надалі було використано при визначенні функціональної залежності функції розподілу щільності станів в нелегованих або слабо легованих напівпровідниках. Отримані результати збігаються з класичними моделями Коена-Фріцше-Офшінського і Мотта-Девіса. Однак запропонована автором модель відрізняється простотою, що полегшує її застосування при розрахунках, в яких необхідно враховувати вплив ступеня розупорядкованості аморфного кремнію.

У третьому розділі наведено розрахунки спектрального розподілу коефіцієнта поглинання аморфного кремнію в залежності від ступеня розупорядкованості з урахуванням результатів роботи, наведених у другому розділі. Отримана спектральна залежність коефіцієнта поглинання добре узгоджується з даними інших робіт, що свідчить про достовірність результатів дисертаційної роботи. Також в розділі проведено дослідження фотопровідності напівпровідникової структури, яка являє собою кристалічний кремній з рівномірно розташованими вкрапленнями аморфного кремнію циліндричної і сферичної форми. Досліджено кінетику фотопровідності такої структури в залежності від радіусів включень і відстаней між ними. Встановлено закономірності зміни фотопровідності. Наведені результати чисельних досліджень показують перспективність застосування подібних структур для створення ефективних кремнієвих фотоперетворювачів наступного покоління.

У четвертому розділі для обґрунтування і підтвердження результатів третього розділу наводиться технологія створення аморфних включень в кристалічному кремнії за допомогою радіаційної обробки монокристалічного кремнію з наступним його відпалом при температурах до 900 градусів, створена на базі ННЦ ХФТІ. Автором проведено розрахунок фотопровідності такої структури з урахуванням результатів попередніх глав. Наведені результати показують, що отримані теоретичні результати достовірні.

В цілому робота справляє позитивне враження. Необхідно відзначити достатньо високий рівень вирішення теоретичних питань. Автор творчо підійшов до побудови нових математичних моделей. Істотною перевагою роботи, що додає їй практичної значимості, є цілеспрямоване використання нових експериментальних результатів у моделюванні процесів фотопровідності гетероморфних структур. Цим автор демонструє не тільки свій високий теоретичний рівень, а й глибоке знання результатів відповідних експериментів, проведених як на кафедрі здобувача, так і в інших наукових колективах.

**Наукова новизна** отриманих в дисертації результатів полягає в тому, що

1. Отримано розподіл щільності електронних станів та спектр нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів в гетероморфному кремнії з урахуванням ступеня розупорядкованості структури, розмірів та морфології включень.

2. Одержано характеристики фотопровідності гетероструктури аморфного гідрогенізованого та монокристалічного кремнію в залежності від розмірів та морфології аморфних включень в кристалічному субстраті.

3. Отримали подальший розвиток методи розрахунку впливу аморфних неоднорідностей на фотопровідність кристалічного кремнію в залежності від фізичних властивостей і геометрії цих неоднорідностей, що дозволило поглибити уявлення про фізичні процеси в гетероструктурах типу аморфний/кристалічний кремній.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Побудовані в роботі моделі ґрунтуються на коректному застосуванні теорії напівпровідникових матеріалів та відповідного математичного апарату. Усі твердження підтверджено посиланнями на джерела. Результати роботи відповідають загальним уявленням та логічно доповнюють відомі положення. Математичний апарат, алгоритми і методики, запропоновані автором дисертації, підтверджено результатами імітаційного моделювання і порівнянням з раніше отриманими результатами. Це дає підставу вважати висновки дисертаційної роботи цілком обґрунтованими та достовірними.

Автореферат повністю відображає основний зміст дисертації. Матеріали дисертації опубліковані, пройшли апробацію на міжнародних конференціях. Серед них є публікації у спеціалізованих фахових наукових виданнях України, що задовольняють вимогам МОН України до публікацій за спеціальністю. Загалом за темою дисертації автор опублікував у співавторстві 8 статей у фахових журналах і зробив 13 доповідей на

міжнародних наукових конференціях. Таким чином, в цілому дисертація оцінюється як робота, що має високий науковий рівень.

**З недоліків** роботи можна відзначити наступне.

1. У роботі не розглянуто перспективи та наслідки продовження тенденції подальшого зменшення вартості кіловата сонячної енергії в разі активного застосування сонячних елементів на основі аморфно/кристалічних кремнієвих структур.

2. У формулі 3.1 (с. 86) присутній матричний елемент оптичного переходу. У роботі не приділено належної уваги фізичній інтерпретації його вкладу в загальний коефіцієнт поглинання. Можливо, керуючи певним чином його величиною, можна отримати значний вплив на коефіцієнт поглинання і тим самим на ефективність напівпровідникової структури в цілому.

3. За результатами роботи не зрозуміло, якій формі аморфних включень в монокристалічному кремнії слід віддати перевагу з точки зору збільшення ефективності фотоперетворення.

4. Для перевірки розроблених моделей і проведення математичних обчислень використовувалися універсальні засоби моделювання (зокрема, система MathCad). Можливо, у даному випадку більш ефективними та надійними виявилися б спеціалізовані засоби моделювання фізичних процесів в напівпровідниках (наприклад, Synopsys TCAD).

5. Виявлений в роботі ефект виникнення при певних умовах негативної фотопровідності, який може бути перспективним для створення нового класу напівпровідникових приладів, практично не було піддано подальшому вивченню.

Проте, зазначені недоліки жодною мірою не знижують цінності та практичної значимості отриманих автором наукових результатів.

**Загальний висновок.** Дисертаційна робота О. Ю. Бабиченко «Фотоелектричні властивості структур кристалічного кремнію з гідрогенізованими нанорозмірними вкрапленнями» є завершеною науковою працею і виконана на високому науковому рівні. Результатом роботи є

вирішення важливої задачі, що стосується актуального напрямку в розвитку сонячної енергетики. Наведені результати можна класифікувати як нові, обґрунтовані, та такі, що мають суттєве наукове і практичне значення. Дисертацію написано логічно, грамотно і акуратно оформлено. Робота повністю відповідає вимогам Положення Кабінету Міністрів України про порядок присудження наукових ступенів щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Бабиченко Оксана Юріївна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 - фізика приладів, елементів і систем.

Офіційний опонент,  
завідувач лабораторії фізико-технічних  
основ напівпровідникової фотоенергетики

Інституту фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук, ст. н. с.

 В.П. Костильов

Підпис В.П. Костильова засвідчую:

Учений секретар Інституту фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
доктор х. наук, проф.



 В.М. Томашик