

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Хрипка Сергія Леонідовича на тему «Модифікування структур системи кремній - пористий кремній - нанорозмірні плівки оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO) для пристроїв електронної техніки», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

Актуальність теми. Суттєвий інтерес до вивчення структурних та фізичних властивостей напівпровідникових матеріалів призводить до створення нового покоління надмініатюрних швидкодіючих приладів і структур, принцип дії яких заснований на квантово-розмірних ефектах. Глибоке розуміння взаємного зв'язку між фізичними процесами у плівкових і ниткоподібних структурах кремнію та їх електрофізичними та оптичними властивостями дозволить установити умови формування матеріалів для сонячних елементів і пристроїв мікросистемної техніки зі стабільними, відтворюваними характеристиками, які мають широкий спектр поглинання. Однак на сьогоднішній день, не дивлячись на велику кількість і інтенсивність досліджень спостерігається недостатня вивченість фізичних явищ та процесів, які протікають в твердих тілах, що і стримує широке їх застосування в приладах нанoeлектроніки. Однією з причин великого комерційного потенціалу напівпровідникових пристроїв на основі кремнію є те, що вони можуть виготовлятися достатньо дешево і у великих кількостях, а також, завдяки можливості поєднання провідних властивостей з оптичними властивостями, такі матеріали матимуть великі перспективи для створення пристроїв мікро- та нанoeлектроніки. Для практичного використання даних матеріалів існує необхідність вдосконалення технології створення мікроструктур за рахунок поєднання системи кремній – пористий кремній та нанорозмірних плівок оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO), що дозволить суттєво поширити номенклатуру сучасної елементної бази світло- та фотоперетворювальної мікро- та наносистемної техніки, чому саме і присвячена робота Хрипка С.Л.

Наукова новизна отриманих результатів. Широкий перелік теоретичних і експериментальних досліджень, що проведені в роботі, дозволили автору здобути низку цікавих наукових результатів. Серед них варто виділити такі:

- встановлено зв'язок та виявлено кореляцію між особливостями змін електрофізичних та оптичних властивостей в широкому інтервалі температур пористого кремнію, що покладено в основу концепції розроблення та прогнозування характеристик сучасних приладів твердотілої електроніки;

- встановлено можливість використання методу спреї-піролізу спиртово-водного розчину на основі SnCl_4 для підвищення електричного опору плівок, що відбувається завдяки утворенню локальних рівнів захоплення носіїв заряду. Розроблено технологію виготовлення нанорозмірних плівок провідних оксидів SnO_2 модифікованих домішками фтору. Отримано плівки завтовшки 600 нм, які мають покращені значення електрооптичних параметрів: поверхневий опір – 1,85 Ом/кв, питомий опір – 2,4 Ом·см, рухомість носіїв – $37 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, концентрація носіїв – $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, оптичне пропускання – 85%.

- вперше розроблено метод й технологічно забезпечено створення нових типів приладових структур, а саме сонячних елементів зі структурою кремній – пористий кремній – нанорозмірна плівка оксиду (SnO_2 , ZnO), легованого металами (F, Sb, Al), та встановлено, що ефективність коефіцієнта їх корисної дії сягає досить високих значень (до 16% завдяки керуванню відбивальною та поглинальною властивостями плівок оксидів і до 17% за рахунок додаткового гетерувального ефекту пористого кремнію).

- для прогнозування електричних характеристик сонячного елемента розроблено математичну модель, яка дає змогу встановити залежності його електричних характеристик від зовнішніх умов (температура, сонячна інсоляція), а також від зміни параметрів моделі діода, послідовного та шунтувального опорів.

Новизна цієї дисертації не вичерпується лише зазначеними положеннями. Можна відзначити ще цілу низку експериментально виявлених і теоретично обґрунтованих явищ, які забезпечують суттєве підвищення

ефективності експлуатаційних характеристик пристроїв.

Практичне значення результатів. Необхідно відзначити практичну спрямованість даної дисертаційної роботи. Насамперед це стосується того, що запропоновані рішення є «технологічно-сумісними» з точки зору масового виробництва. Отримані результати комплексних досліджень, знайдені рішення і розвинуті експериментальні і аналітичні підходи дали змогу автору запропонувати напрями практичних застосувань, серед яких, на мою думку, найважливішими є такі:

- результати досліджень використано для створення низькорозмірних приладових структур, а також приладів, виготовлених за рахунок поєднання технологій створення модифікованих структур на основі пористого кремнію та нанорозмірних плівок оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO), що є сумісним із сучасною технологією;

- розроблено технологію модифікування структури системи кремній – пористий кремній та нанорозмірної плівки оксиду SnO_2 домішками фтору за методом спреї-піролізу, що забезпечує застосування плівок як прозорих шарів;

- розроблено технологію модифікування структури системи кремній – пористий кремній та нанорозмірної плівки оксиду ZnO , легованої алюмінієм та сурмою. Вперше було визначено величину оптичної забороненої зони плівки, яка становила 3,31–3,47 eV та 3,25–3,35 eV відповідно, забезпечено оптичне пропускання в межах 90...96% у видимій та інфрачервоній ділянці, що дало можливість застосування плівок як буферних шарів у тонкоплівкових сонячних елементах;

- результати досліджень використано для створення сонячних елементів, які при освітленні 100 мВт/см^2 характеризуються такими параметрами: $I_{sc} = 36,3 \text{ мА/см}^2$ $U_{oc} = 615 \text{ мВ}$ $FF = 79,3$ ККД=17,4%.

Практичні рекомендації дисертації впроваджені у виробництво та в навчальний процес, що підтверджено відповідними актами.

Розроблені автором ключові технологічні і технічні рішення захищені патентами на винаходи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і

рекомендацій.

У роботі розглянуто велике коло питань, що пов'язані між собою єдиною методологією. Сформульовані проблема та мета досліджень. У відповідності з метою досліджень проблема розбивається на ряд складових взаємопов'язаних частин, що визначають основні напрямки досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації які сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні класичних і сучасних методів та основних положень фізики напівпровідників, напівпровідникових приладів, електрофізичного діагностування, тестового контролю. Це дозволило побудувати фізичні моделі, розробити методики досліджень, способи оптимізації для проведення наукових досліджень, способи і методи формування структур системи кремній – пористий кремній та нанорозмірні плівки оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO). Проведені дослідження лягли в основу розробки конструкції приладів сенсорної електроніки

Достовірність отриманих результатів. Теоретичні положення підтверджені результатами багатьох експериментальних досліджень, результатами вимірювання оптичних та електрофізичних параметрів елементів та структур, зокрема, структур системи кремній – пористий кремній та нанорозмірні плівки оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO), що були впроваджені на ТОВ «Елемент-Перетворювач» та ДП ВАТ «Концерн-Електрон» науково-виробничого підприємства «Карат»,

Крім цього використання промислового технологічного обладнання, сучасної обчислювальної техніки, методик експериментальних досліджень, висока узгодженість експериментальних даних із теоретичними моделями, як розроблених автором, так і запозичених з літератури, дозволяють стверджувати, що наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертації є достатньо достовірними.

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.

Результати досліджень, які описані в дисертації, з необхідною повнотою викладені у 57 друкованих працях, зокрема 25 у спеціалізованих наукових фахових виданнях, 8 – у журналах, які включені до міжнародних

наукометричних баз, у трьох монографіях, 4 патентах та матеріалах, докладених на 20 конференціях. Опубліковані праці дають змогу простежити шлях від постановки задач до алгоритму їх вирішення й отримання результатів досліджень. Аналіз змісту дисертації та опублікованих автором робіт свідчить про те, що наукові положення, висновки і рекомендації опубліковані в повному об'ємі та обговорені на міжнародних і вітчизняних науково-практичних конференціях. Таким чином робота, яка рецензується, достатньо повно проаналізована й позитивно оцінена спеціалістами та науковцями в галузі фізики та електроніки як в Україні, так і за її межами. Автореферат дисертаційної роботи відповідає її змісту та опублікованим роботам.

Аналіз змісту дисертації

Дисертація складається зі Вступу, оглядового розділу та шести розділів оригінальних досліджень, Висновків та Списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації - 303 сторінки, із них 271 сторінки основного тексту, 124 рисунки, 25 таблиць і список використаної літератури, який містить 339 найменувань.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи

По дисертаційній роботі слід зробити наступні зауваження:

1. У дисертації (розділ 4. ст. 146) та авторефераті (ст. 12) наведено дані, щодо впливу одновісної деформації на температурні залежності реактивної складової опору ниткоподібних кристалів з різним ступенем наближення до переходу метал-діелектрик. Виявлені характерні особливості низькотемпературної провідності у запропонованій моделі автор пов'язує з проявом поверхневої провідності у кристалах. Однак необхідно було б навести більше експериментальних даних щодо доказу приповерхневого механізму перенесення носіїв заряду.

2. Автор дисертації, при аналізі та розрахунку параметрів стрибкової провідності ниткоподібних мікро- і нанокристалів кремнію не приводить даних про ступінь компенсації, яка є необхідною умовою для забезпечення стрибкової провідності в класичному випадку.

3. В процесі вирощування зразків ниткоподібного кремнію, а також

лазерної перекристалізації сильно легованого полікристалічного кремнію можуть виникати просторові флуктуації концентрації заряджених домішок. На жаль, в роботі дане питання не обговорюється.

4. З експериментальних досліджень, наведених автором під час розроблення сенсорів деформації на основі мікрокристалів кремнію, працездатних в умовах змінного струму, не спостерігається чіткого розмежування щодо використання уявної чи дійсної складової опору, адже при реалізації пристроїв, працездатність яких обумовлена виділенням тільки реактивної складової опору, призведе до значної економії ресурсів споживання за рахунок зменшення розсіяного джоулевого тепла.

5. У роботі наведено пункти висновків, які відображають фундаментальність досліджень (п.2,3,4). Для практичної реалізації досліджень було б доцільно конкретизувати, для яких саме технічних вирішень, розроблення пристроїв тощо служать отримані фундаментальні результати.

6. У розділі 3 не наведено даних щодо залежності коефіцієнта тензочутливості у полікристалічному кремнії, який опромінено високоенергетичними електронами, адже це важливо з точки зору розроблення сенсорів деформації, працездатних в складних умовах експлуатації.

7. В дисертації відсутні графічні зонні діаграми, що наглядно пояснюють механізми низькотемпературного транспорту носіїв по домішкових зонах.

Зустрічаються огріхи і в оформленні роботи. В літературних посиланнях зустрічається деяка невідповідність до правил бібліографічних скорочень.

Однак, ці критичні зауваження не ставлять під сумнів основні результати та висновки дисертаційної роботи і не знижують їх загальну оцінку, а можуть виступати рекомендаціями щодо подальших наукових дослідженнях автора.

Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертація Хрипка Сергія Леонідовича є завершеною науковою

працею. В дисертації отримані нові наукові результати, а також розв'язано науково-прикладну проблему створення елементів та структур на базі системи кремній – пористий кремній та нанорозмірні плівки оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO). В сукупності усе сказане свідчить, що дисертація яка опонується є суттєвим внеском у розвиток сучасної нано- і мікроелектроніки, а також для створення ряду нових приладів електронної техніки.

Вважаю, що дисертаційна робота на тему «Модифікування структур системи кремній - пористий кремній - нанорозмірні плівки оксидів (SiO_2 , SnO_2 , ZnO) для пристроїв електронної техніки» за змістом та оформленням повністю відповідає вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор ХРИПКО Сергій Леонідович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Завідувач кафедру електронних систем
Запорізької державної інженерної академії,
д.т.н., професор

Т.В. Критська

Підпис зав. каф. електронних систем,
д.т.н., проф. Критської Т.В. засвідчую.

Проректор з НІР ЗДІА,
к.ф.-м.н., доцент.



Г.П. Коломоєць

69006, проспект Соборний, 226,
Запорізька державна інженерна
академія, м. Запоріжжя, Україна