ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бендака Андрія Васильовича "Одержання, структура та фізичні властивості тонких плівок на основі аргіродитів Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I", представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10- фізика напівпровідників і діелектриків

Досліджувані матеріали Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I є цікавими об'єктами як з точки зору фундаментальної, так і прикладної фізики, оскільки являються суперіонними провідниками і характеризуються високими значеннями іонної провідності. Це, в свою чергу, робить їх перспективними матеріалами для розробки новітніх джерел енергії, іоністорів, суперконденсаторів, електрохімічних сенсорів тощо. Не менш важливими залишаються розробки в напрямку удосконалення методів отримання аргіродитів та перехід до тонкоплівкових технологій, оскільки мініатюризація пристроїв є невід'ємною вимогою прогресу. Тому дослідження структури, механічних, електричних та оптичних властивостей тонких плівок, а також пошук нових методик їхнього отримання, є мотивованим завданням. Таким чином, на нашу думку, тема дисертаційної роботи Бендака Андрія Васильовича "Одержання, структура та фізичні властивості тонких плівок на основі аргіродитів Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I" є важливою та актуальною.

Дисертаційне дослідження виконувалося на кафедрі прикладної фізики та в науково-дослідному інституті фізики і хімії твердого тіла ДВНЗ "Ужгородський національний університет" у відповідності до галузевих тем та за підтримки міжнародних програм. Відзначимо, що дисертаційна робота за структурою і викладом відповідає вимогам ДАК МОН України. Автор вдало спланував структуру дисертаційної роботи, яка складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку цитованої літератури

Дисертантом визначено за об'єкт досліджень фізичні явища та процеси структурного розупорядкування в тонких плівках на основі суперіонних сполук зі структурою аргіродита.

Для виконання дисертаційної роботи автором використовувалися різноманітні методи досліджень:

1. Магнетронне розпилення, комбіноване магнетронне розпилення (одночасно з двох мішеней для отримання плівок з різним вмістом міді) та методика високоефективного розпилення мішені (HiTUS) для одержання тонких плівок на основі сполук Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I.
2. Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія, скануюча електронна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, рентгенодифракційні дослідження та раманівське розсіювання світла для визначення компонентного складу та структури досліджуваних тонких плівок.
3. Спектроскопія оптичного поглинання та спектральна еліпсометрія для дослідження оптичних параметрів і вивчення впливу лазерного, рентгенів-

ського, електронного опромінення, а також термічної обробки на оптичні властивості тонких плівок.

4. Наноіндентування й електричні дослідження для вивчення механічних та електричних властивостей тонких плівок.

Слід відзначити ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків. Таким чином, автором:

– методами енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії, атомно-силової мікроскопії та дифракції рентгенівських променів визначено хімічні склади тонких плівок на основі сполук Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I та досліджено їх структуру;

– в результаті досліджень раманівського розсіювання світла у тонких плівках на основі Cu_6PS_5I, отриманих методом комбінованого розпилення з двох магнетронів, показано, що досліджувані плівки є розупорядкованими та аморфними, структурні одиниці PS_4 зберігаються, але є деформованими, а виникнення додаткових смуг при 425 $см^{-1}$ ймовірно є результатом виникнення структурних одиниць PS_3;

– встановлено, що при зміні хімічного складу тонких плівок від $Cu_{5.4}P_{1.9}S_{5.0}I_{0.7}$ до $Cu_{7.6}P_{0.9}S_{3.4}I_{1.}$ спостерігається плавне збільшення загальної провідності від 0.044 См/м до 0.066 См/м, а при концентраціях міді більших за 60 ат.% спостерігається її різке зростання від 0.084 См/м ($Cu_{7.9}P_{0.7}S_{3.6}I_{0.8}$) до 0.394 См/м ($Cu_{9.3}P_{0.5}S_{2.6}I_{0.6}$), що є результатом утворення суцільних каналів міді у структурі плівки. При дослідженні механічних властивостей виявлено, що нанотвердість тонких плівок на основі Cu_6PS_5I є майже в 3 рази меншою, ніж нанотвердість монокристалу Cu_6PS_5I;

– в результаті спектральних досліджень з'ясоваано, що край поглинання в досліджуваних тонких плівках зі збільшенням відносної концентрації міді зміщується в довгохвильову область, а показник заломлення нелінійно збільшується. Встановлено взаємозв'язок між структурними, електричними та оптичними властивостями серії тонких плівок з різними концентраціями купруму;

– проведено порівняльний аналіз методів напилення тонких плівок і показано, що отримана магнетронним напиленням тонка плівка $Cu_{6.6}Ge_{1.5}S_{5.1}I_{0.8}$ є більш близькою до стехіометричного складу, ніж тонка плівка $Cu_{5.9}Ge_{2.6}S_{5.3}I_{0.2}$, одержана методом HiTUS;

– при вивченні впливу зовнішніх чинників на оптичні характеристики тонких плівок виявлено, що опромінення лазером довжиною хвилі 532 нм не приводить до суттєвих змін, тоді як опромінення рентгенівським випромінюванням та електронами призводить до розмиття краю поглинання, збільшення урбахівської енергії, що є результатом процесів структурного розупорядкування в досліджуваних тонких плівках. Цим же методом досліджено вплив відпалу і встановлено, що відпал призводить процесів упорядкування в тонких плівках, про що свідчить зменшення урбахівської енергії.

У дисертації представлено й інші результати, але вищезгаданих достатньо, на нашу думку, щоб відзначити високий науковий рівень

дисертаційної роботи А.В.Бендака, певні аспекти якої, безумовно, мають також і практичне значення.

Водночас слід зазначити, що дисертаційна робота А.В. Бендака не позбавлена й окремих недоліків, серед яких варто виділити такі:

1. У дисертації наводяться результати досліджень електричної провідності на одній частоті при кімнатній температурі, хоча результати частотних та температурних досліджень дозволили б встановити механізми процесів провідності та визначити енергії активації. Крім цього, в дисертації не наводиться співвідношення іонної й електронної компонент електропровідності, що є важливим для суперіонних провідників.

2. За результатами досліджень встановлено, що аніонне заміщення атомів S на атоми Se та катіонне заміщення атомів P на атоми Ge в тонких плівках на основі аргіродитів ведуть до їх структурного упорядкування та послаблення електрон-фононної взаємодії. На жаль, пояснення цього цікавого факту не знайшло належне відображення у тексті дисертації.

3. Вплив опромінення рентгенівським випромінюванням вивчався на оптичні характеристики системи "плівка-підкладка". З тексту дисертації не зрозуміло, чи досліджувалися окремо оптичні властивості неопроміненої та опроміненої підкладки для встановлення впливу опромінення на саму плівку.

Однак ці зауваження жодним чином не зменшують наукової цінності даної роботи.

Таким чином, актуальність теми дисертації, вибір об'єктів та методів досліджень, відзначена наукова новизна отриманих результатів засвідчують загальний високий науковий рівень дисертаційного дослідження. В цілому дисертація є завершеним науковим дослідженням, результати якого суттєво доповнюють і розвивають фундаментальні знання про суперіонні провідники. В ній виконаний цілий комплекс експериментальних досліджень та запропоновано нові підходи до вирішення поставлених задач. Автореферат дисертації відповідає її змісту.

Сформульовані наукові положення та висновки, зроблені в роботі, вказують на перспективність використаних автором напрямків досліджень. Результати роботи можуть бути рекомендовані для впровадження в НВО «Інститут монокристалів» (м. Харків), НВО «Карат» (м. Львів), Інститут фізики НАНУ (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ (м. Київ), Інститут електронної фізики НАНУ (м. Ужгород), університети Міністерства освіти і науки України.

Результати, наукові положення і висновки широко представлено в друкованих наукових працях, апробовано на багатьох конференціях. Основні результати дисертації опубліковано в 9 статтях у фахових журналах та 14 тезах доповідей.

На нашу думку, представлена робота "Одержання, структура та фізичні властивості тонких плівок на основі аргіродитів Cu_6PS_5X (X= I, Br), Cu_6PSe_5I та Cu_7GeS_5I" в повній мірі задовільняє "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України, а її автор, Бендак Андрій Васильович

заслуговує присвоєння йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу матеріалів
функціональної електроніки
Інституту електронної фізики НАН України Гомоннай О.В.

Підпис Гомонная Олександра Васильовича засвідчую:

Вчений секретар
Інституту електронної фізики НАН України
кандидат хімічних наук Романова Л.Г.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОННОЇ ФІЗИКИ
Код № 05540008
м. Ужгород