

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МУХАММЕД АБІД АЛЬ КАРІМ

УДК 538.975 (043.5)

**СТРУКТУРНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
НА ОСНОВІ ПЛІВОК ZnO ТА AlN**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Погребняк Олександр Дмитрович,
Сумський державний університет,
в. о. завідувача кафедри наноелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник, професор
Куницький Юрій Анатолійович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
професор кафедри загальної фізики;

доктор фізико-математичних наук, доцент
Опанасюк Анатолій Сергійович,
Сумський державний університет,
в. о. завідувача кафедри електроніки і комп'ютерної
техніки.

Захист відбудеться " _____ " листопада 2012 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий " ____ " жовтня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Оксид цинку становить значний інтерес дослідників у зв'язку з можливістю прикладного використання. Цей матеріал має високу радіаційну, хімічну і термічну стійкість і в перспективі може широко використовуватися при створенні елементів прозорої електроніки. Завдяки поєднанню унікальних оптичних, електричних та п'єзоелектричних властивостей ZnO може застосовуватися в газових сенсорах, пристроях генерації поверхневих акустичних хвиль, фотонних кристалах, фотодіодах. Крім того, оксид цинку є перспективним катодоліноміофором. Завдяки широкій забороненій зоні напівпровідники ZnO ($E_g = 3,37$ eV) та AlN ($E_g = 6,20$ eV) можна використовувати як детекторний матеріал для реєстрації ультрафіолетового випромінювання. На основі цих матеріалів можливе також створення ефективних світловипромінювальних (LEDs) і лазерних діодів. Відносно невелика невідповідність сталих ґратки ZnO та AlN (4,4 %) дозволяє виготовляти на їх основі гетеропереходи з властивостями, близькими до ідеальних. Плівки ZnO та AlN також привертають увагу дослідників як віконні, антивідбивні, захисні та струмознімальні шари дешевих сонячних елементів (СЕ) великої площі.

При створенні фотодетекторів та СЕ особливий інтерес становлять гетеропереходи n -ZnO/ p -Si та n -ZnO/ n -CdS/ p -Si. Це пов'язано з широкою областю fotocутливості таких структур ($\lambda = 560$ – 2000 нм), їх низькою вартістю та доступністю матеріалів гетеропари. Однак ККД таких структур поки що не перевищує 8 %. Підвищення ефективності СЕ можливе як шляхом оптимізації властивостей окремих шарів, так і конструкції фотоперетворювача у цілому. Сьогодні це здійснюють шляхом моделювання параметрів СЕ з використанням існуючого програмного забезпечення. Для реалістичного моделювання електричних характеристик (на постійному та змінному струмах) тонкопліткових СЕ з гетеропереходами в цей час існує декілька програм (AMPS-1D, SCAPS-1D, PC-1D, ASA та AFORS-HET), але найбільш розробленою та зручною для використання можна вважати програму SCAPS-1D. Ця програма дозволяє розраховувати основні характеристики СЕ (ККД (η), фактор заповнення вольт-амперної характеристики (ВАХ) (FF), струм короткого замикання (J_{sc}) та напругу холостого ходу (V_{oc})) при максимальному врахуванні як індивідуальних характеристик напівпровідникових шарів, що входять до складу фотоелементів, так і досконалості межі поділу гетеропереходів.

Для отримання тонких шарів сполук ZnO та AlN у цей час широко використовують такі методи, як магнетронне розпилення, хімічне осадження з парової фази (CVD) та золь-гель-методи. Однак властивості полікристалічних плівок широкозонних напівпровідникових сполук, нанесених цими методами,

на цей час досліджені недостатньо, що гальмує процес їх практичного використання у реальних приладах та їх елементах.

Таким чином, проблеми, пов'язані з розробленням фізичних основ керування структурно чутливими властивостями шарів фотоактивних приладів мікроелектроніки на основі конденсатів ZnO та AlN, оптимізацією їх структурних, електрофізичних та оптичних характеристик, основних характеристик СЕ на основі цих сполук, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у рамках держбюджетних НДР № 0107U001292 (2007–2009 рр.) «Дослідження електрофізичних, оптичних, структурних характеристик тонких плівок та багатошарових структур на основі сполук A_2B_6 та їх твердих розчинів» та № 0110U001151 (2010–2012 рр.) «Отримання та дослідження плівок телуриду кадмію та твердих розчинів на його основі для СЕ та детекторів випромінювання». Здобувач брав участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень.

Мета і завдання дослідження. Мета цієї роботи полягала в установленні загальних закономірностей формування властивостей та структури покриттів для СЕ із ZnO та оптичних, електричних властивостей для покриттів з AlN, отриманих методами CVD, золь-гель, магнетронним розпиленням залежно від умов та параметрів їх отримання. Оптимізація параметрів окремих шарів та конструкції в цілому СЕ на основі гетеропереходів $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-Si}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-ClGS}$.

Для реалізації поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- вивчити вплив фізичних параметрів нанесення плівок ZnO, таких, як температура осадження і відпалу, час осадження, швидкість потоків газів та положення зразків у робочій камері на властивості та структуру шарів, отриманих методом CVD;
- визначити фізичні властивості плівок ZnO та ZnO:Al, отриманих за допомогою золь-гель-технології, при зміні площі та концентрації алюмінію в плівках, а також умов процесу відпалу;
- дослідити морфологію поверхні та структурні властивості плівок нітриду алюмінію, нанесених методом магнетронного розпилення;
- дослідити електрофізичні властивості конденсатів нітриду алюмінію, такі, як частотно-ємнісна залежність, залежність тангенса діелектричних втрат від частоти тощо;
- оптимізувати параметри СЕ на основі гетероструктури $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$;
- провести моделювання вольт-амперних характеристик та квантового виходу залежно від товщини абсорбуючого $p\text{-Si}$ -шару, температури, концентрації домішок, а також від товщини віконного шару ZnO.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси і явища, та структурні характеристики оксидних і нітридних плівкових матеріалів для СЕ; оптимізація

їх структурних та оптичних властивостей з метою створення високоефективних СЕ на їх основі.

Предмет дослідження – структурні, субструктурні, оптичні та електрофізичні властивості мікроструктурованих плівок ZnO та AlN, гетероструктури *n*-ZnO/*p*-Si, отримані різними методами.

Відповідно до поставлених завдань використовувалися такі **методи дослідження** зразків: растрова електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, атомно-силова мікроскопія, спектрофотометричні та частотно-ємнісні дослідження, холлівські вимірювання, моделювання електрофізичних характеристик СЕ (SCAPS).

Наукова новизна отриманих результатів

1. Уперше показано, що при збільшенні концентрації Al до 8 % у плівці ZnO формується композит, який складається з нанокристалітів ZnO та Al.

2. Визначено, що при збільшенні температури підкладки при осадженні плівок ZnO від 623 до 773 К методом CVD розміри зерна збільшуються, що пов'язано зі зміною характеру механізму росту плівок від пошарового до стовпчастого.

3. Показано, що в плівках ZnO:Al коефіцієнт пропускання зменшується зі зменшенням довжини хвилі від 900 до 350 нм та зростає зі збільшенням концентрації домішки Al до 8% при однаковій температурі осадження, що дає можливість використовувати плівки ZnO з різною концентрацією домішки алюмінію в оптоелектроніці.

4. Вперше отримані вольт-амперні характеристики і квантовий вихід гетеросистем *n*-ZnO/*p*-Si з різною концентрацією домішки в шарах *p*-Si і *n*-ZnO та різною товщиною абсорбуючого (поглинаючого) шару в гетеропереходах *n*-ZnO/*p*-Si. Показано, що зростання ККД СЕ спостерігається при досягненні товщини поглинаючого шару в 600 нм.

5. Встановлено вплив фізико-технологічних режимів отримання оксидних і нітридних матеріалів на морфологію поверхні, значення ємності, їх мікротвердість.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Фундаментальне значення полягає в інтерпретації явищ та закономірностей формування властивостей досліджених матеріалів. Отримана інформація про кристалічну структуру, морфологію поверхні плівок ZnO, ZnO:Al та AlN, їх механічні, оптичні та електрофізичні характеристики сприяє подальшому розвитку основ матеріалознавства сполук ZnO і AlN та може бути використана для створення високоефективних приладів на їх основі. Проведене моделювання основних характеристик фотоелементів на базі гетеропереходів *n*-ZnO/*p*-Si, *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-Si, *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-CIGS сприяє вибору їх оптимальної конструкції, що дозволяє підвищити ефективність таких СЕ.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному пошуку та аналізі літературних джерел за темою дисертації. Постановка мети і завдань роботи, вибір методів нанесення покриттів (плівки) та методів їх дослідження, а також обговорення отриманих результатів проводилися разом із науковим керівником проф. О. Д. Погребняком.

Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно та у співавторстві з колегами. Безпосередньо дисертантом різними методами були отримані плівки (покриття) із ZnO та ZnO:Al, результати моделювання вольт-амперних характеристик гетероструктур для CE *n*-ZnO/*p*-Si. Також були проведені оптичні дослідження, електронна растрова мікроскопія, інтерпретація всіх отриманих результатів дисертаційної роботи. Автор підготував такі тексти: статей – 7, доповідей – 1, тез доповідей – 4.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на таких конференціях: VII Национальной конференции «Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов» РСНЭ-НБИК 2009 (Москва, Російська Федерація, 2009), науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій (Суми, Україна, 2009, 2010), II Науковому семінарі «Сучасні проблеми наноелектроніки» (Суми, Україна, 2011), 7th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation», NEET-2011 (Закопане, Польща, 2011 р.), 1-st International Conference: «Nanomaterials, Applications & Properties» NAP-2011 (Алушта, Україна, 2011 р.), науково-технічній конференції ФЕЕ-2011 (Суми, Україна, 2011).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені у 15 публікаціях, у тому числі в 10 статтях у періодичних фахових наукових виданнях.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, 4 розділів, загальних висновків та переліку літературних посилань. Дисертація викладена на 154 сторінках, містить 77 рисунків та 24 таблиці. Перелік використаних джерел складається із 197 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, визначені їх об'єкт та предмет, розкриті наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію результатів та структуру дисертації.

Перший розділ «Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок ZnO, AlN і гетеропереходів ZnO/Si» присвячений огляду існуючих літературних джерел та складається з чотирьох підрозділів. У *першому підрозділі* наведені

основні фізичні властивості оксиду цинку, розглянуті можливості застосування цієї сполуки в оптоелектроніці та сонячній енергетиці. Проведено аналіз літературних даних стосовно структурних та оптичних характеристик матеріалу. Показано, що монокристали та плівки сполук мають гексагональну структуру (рис. 1 а, б) типу вюрцитит. Наприкінці підрозділу розглянуті методи отримання наноструктур на основі оксиду цинку.

У *другому підрозділі* наведені дані про основні фізичні властивості плівок нітриду алюмінію та описана перспектива його застосування у п'єзоелектроніці та геліоенергетиці. Цей матеріал, як і ZnO, має вюрцитну структуру, хоча кристалізується також у вигляді сфалериту. Показано, що діелектричні сталі AlN та ZnO близькі, їх діелектрична проникність (ϵ_r) приблизно дорівнює 10. Це значення набагато менше, ніж діелектрична стала цирконат-титанату свинцю (ЦТС) – $\epsilon_r \sim 400$. З точки зору акустичної характеристики така діелектрична стала є ідеальною при 1 ГГц.

Відомо, що чим більша швидкість акустичної хвилі, тим вищою є резонансна частота резонатора об'ємних акустичних хвиль. Завдяки таким властивостям нітрид алюмінію більш перспективний, ніж ЦТС та ZnO, з точки зору його застосування в приладах високочастотного діапазону.

У *третьому підрозділі* проведений огляд літератури з основних методів отримання плівок двокомпонентних сполук, таких, як оксид цинку та нітрид алюмінію. Були проаналізовані такі методи отримання двокомпонентних сполук: електроосадження, магнетронне розпилення, метод осаження з водних розчинів, термічне випарування сполук чи їх окремих компонентів у вакуумі, молекулярно-променева епітаксія, а також такі конструктивно близькі методи, як метод гарячої стінки та метод квазізамкненого об'єму.

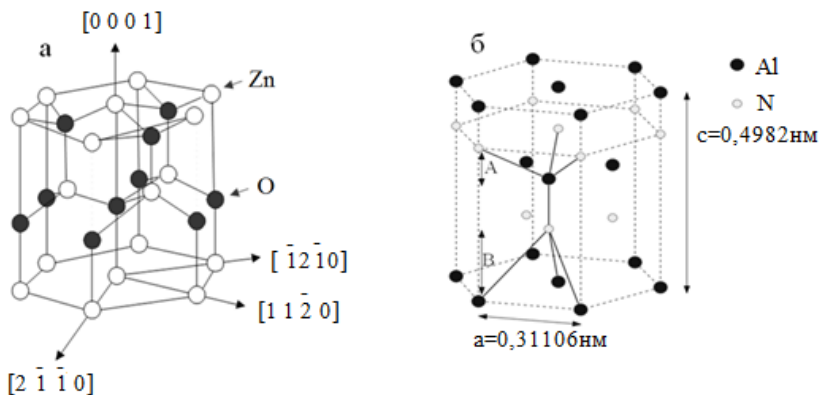


Рис.1. Кристалічна структура з'єднань ZnO (а) та AlN (б)

Вплив методів отримання на властивості плівок дозволив обрати для нанесення дешевих шарів ZnO та AlN методи, розглянуті в дисертаційній роботі. Крім того, був проведений аналіз структурних, оптичних та електрофізичних властивостей конденсатів ZnO та ZnO:Al. Показано, що в більшості робіт вищезазначені властивості були досліджені недостатньо або в такому інтервалі, який не відповідає повній картині властивостей плівок, що й послужило стимулом для подальших досліджень.

У *четвертому підрозділі* були розглянуті механізми зарядоперенесення в гетеропереходах на основі різних напівпровідників. У результаті було показано, що ідентифікація механізму перенесення заряду через гетероперехід дозволяє отримати інформацію про досконалість його межі поділу. Найбільш прийнятні експлуатаційні властивості мають гетеропереходи, близькі до ідеальних, для яких основним механізмом струмоперенесення є дифузійний, а коефіцієнт ідеальності їх ВАХ близький до 2. Це реалізується у випадку, якщо матеріали гетеропереходу мають близькі один до одного параметри кристалічної ґратки.

У *другому розділі* «Методика і техніка експериментів» наведені інформація про методику отримання зразків, методи проведення дослідження їх фазового складу, кристалічної структури та субструктури, механічних, електричних та оптичних властивостей, методика проведення моделювання темнових та світлових ВАХ гетеропереходів, описані процеси осадження та відпалу плівок оксиду цинку на скляних чи кремнієвих підкладках та методика препарування SE n -ZnO/ p -Si.

Плівки ZnO та ZnO:Al були отримані на скляних та кремнієвих підкладках методом осадження з парової фази (CVD). Цей самий метод застосований для створення модельних зразків SE. Для вимірювання швидкості газового потоку при синтезі плівок використовувався водомір. Витрата повітряного потоку, що використовувався для препарування зразків, у всіх випадках дорівнював $3,33 \times 10^{-5}$ м³/с. Найбільш важливими факторами, що впливають на властивості плівок ZnO, отриманих методом CVD, є температура підкладки, швидкість потоку газу, положення зразка у камері синтезу та час його осадження. Фіксувалось три параметри отримання плівок, а четвертий варіювався. При цьому температура підкладки змінювалася в інтервалі $T_s = 570\text{--}770$ К, час конденсації $\tau = 5\text{--}20$ хв, використано три положення підкладки у ростовій камері – посередині та з боків на відстані $l = 0,14$ м від її кінців.

Тонкі плівки ZnO виготовлялися також за допомогою золь-гель-методу. Як вихідний матеріал використовувався безводний ацетат цинку. Для осадження тонких плівок оксиду цинку, легованих алюмінієм, використано суміш розчинів ацетату цинку $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (чистотою 99,95%) у метанолі та AlCl_3 (чистотою 98,5%) з концентрацією 1–5%.

Нанотекстуровані плівки оксиду цинку нарощувалися на кремнієвих підкладках за допомогою системи радіочастотного магнетронного розпилення.

Перед початком осадження плівок у камері створювався вакуум $P = (3 \cdot 10^{-6} \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ Па})$. Як мішень використовувався диск бездомішкового оксиду цинку (чистотою 99,99 %) діаметром 0,10 м. Потужність розпилення становила близько 200 Вт.

Плівки AlN були отримані на підкладках монокристалічного кремнію KEF 4,5 з орієнтацією поверхні площиною (100) з використанням нефільтрованого вакуумно-дугового джерела на модернізованій установці Булат-3Т (ХНУ, Харків, Україна). Перед нанесенням у вакуумній камері зразки підігрівалися до температури 973 К у вакуумі при $P = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Після цього підігрівання підкладки із зразками відключали і проводили очищення поверхні зразків ВЧ-розрядом у середовищі азоту при $U_{ВЧ} = 1000 \text{ В}$, $P_N = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$, час очищення становив 10 хв. Покриття наносили з бічної мішені (катода) шляхом розпилення (Al) у середовищі молекулярного азоту при $P = 0,7 \text{ Па}$, час осадження – 4 хв, струм дуги – 80 А, потенціал зміщення на підкладку подавався від ВЧ-генератора (потужністю 12,5 кВт), значення його становило 30 В. Відстань від підкладки до мішені становила 350 мм.

Для вимірювання товщини плівок у всіх випадках застосовувався ваговий метод із використанням високочутливих електричних терезів QUANTA-221.

Рельєф поверхні плівок був досліджений методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ) із використанням мікроскопів REM-103-E та REM-103-01. Одночасно для вивчення морфології та структури поверхні плівок використовувався електронно-іонний сканувальний мікроскоп Quanta 2003D з рентгенофлуоресцентним мікроаналізатором (EDAX) та відповідним програмним забезпеченням.

Дослідження фазового складу конденсатів проводилися за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М у фільтрованому випромінюванні Fe- K_α та Cu- K_α з використанням у вторинному пучці графітового монохроматора. Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) плівок визначався за фізичним розширенням рентгенівських ліній із використанням співвідношення Дебая-Шеррера.

Електрофізичні властивості плівок (рухливість і концентрація носіїв заряду, а також тип провідності) визначалися з використанням методу Холла.

Оптичні дослідження плівок проводилися за допомогою спектрофотометра ENGLAND у діапазоні довжин хвиль $\lambda = (350\text{--}1000) \text{ нм}$. Були отримані і досліджені спектральні залежності коефіцієнта пропускання $T(\lambda)$, на основі яких з використанням співвідношення Ламберта проведено розрахунок спектральних розподілів коефіцієнта поглинання плівок. Для визначення оптичної ширини забороненої зони E_g матеріалів з їх спектрів поглинання ми використали таке співвідношення: $\alpha_{hv} = A_0(hv - E_g)^{1/2}$, де A_0 – деяка константа, яка залежить від ефективної маси носіїв заряду; hv – енергія оптичних квантів. Із цього випливає, що екстраполяція лінійної частини графіка $(\alpha_{hv})^2 - hv$ на вісь

енергій дозволяє визначити оптичну ширину забороненої зони напівпровідника.

Для отримання гетеропереходів n -ZnO/ p -Si використовувалися пластини монокристалічного кремнію, попередньо очищені від оксиду. Для вивчення характеристик, отриманих СЕ, та визначення їх ефективності вони під'єднувалися до спеціальної вимірювальної схеми. Освітлення зразків проводилося з використанням вольфрамової лампи потужністю 100 Вт через шар води.

Моделювання робочих характеристик СЕ на основі гетеропереходів n -ZnO/ p -Si, n -ZnO/ n -CdS/ p -Si, n -ZnO/ n -CdS/ p -CIGS проводилося з використанням програмного пакета SCAPS-1D. Ця числова програма здатна розв'язувати основні напівпровідникові рівняння, які використовуються для моделювання тонкоплівкових СЕ. Основними рівняннями є рівняння Пуассона та рівняння неперервності для електронів та дірок. Розраховували темнові та світлові ВАХ (I - V), вольт-фарадні (C - V) та частотні (C - f) характеристики, залежності квантового виходу від довжини хвилі ($Q(\lambda)$). Після цього визначали струм короткого замикання, напругу холостого ходу, коефіцієнт заповнення ВАХ, коефіцієнт корисної дії СЕ під час освітлення.

Третій розділ «Дослідження морфології та структурних властивостей плівок ZnO (ZnO:Al) та AlN, отриманих різними методами» складається з чотирьох підрозділів. У *першому підрозділі* подані результати дослідження морфології поверхні та структури плівок. У результаті комплексних досліджень було встановлено, що механізм росту шарів оксиду цинку на скляних підкладках є подібним до механізмів росту інших сполук групи A_2B_6 . При низьких температурах підкладки спостерігався пошаровий ріст плівок, при високих – стовпчастий.

На рис. 2 та 3 показані типові електронно-мікроскопічні знімки поверхні плівок ZnO, отриманих методами CVD та золь-гель. Аналіз мікроструктури показав, що плівки оксиду цинку, отримані методом CVD, мають гранулоподібну структуру.

Зі збільшенням температури підкладки розмір зерен збільшувався. Розміри зерен у всіх зразках також збільшилися від 0,1–0,2 до 1–1,5 мкм після відпалу.

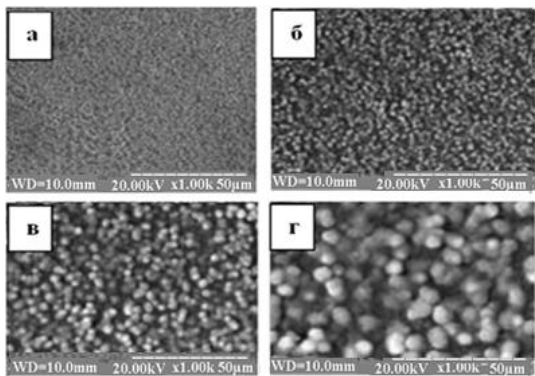


Рис. 2. Мікроструктура поверхні плівок оксиду цинку, які отримані CVD-методом. T_s , К: 623 (а); 673 (б); 723 (в); 773 (г)

Слід зазначити, що бездомішкові плівки оксиду цинку, отримані при $T_s = 773$ К, за структурою і властивостями відрізняються від шарів, отриманих при T_s , меншій за 623 К. Так, плівкові зразки, отримані в діапазоні температур від 623 до 773 К, були матовими, білого кольору, проводили електричний струм. Конденсати, отримані при $T_s = 773$ К, були коричневого кольору з діелектричними властивостями. Порівняння морфології поверхні плівок оксиду цинку, які отримані CVD та золь-гель-методами, свідчить, що спостерігається

суттєва різниця в їх зовнішньому вигляді. Так, плівки, одержані методом CVD, мають яскраво виражену кристалічну структуру, у випадку із плівками, отриманими золь-гель методом (рис. 3), спостерігається деяке погіршення якості текстури конденсатів, такі шари мають суттєво менший розмір зерна та якість текстури. Морфологія поверхні плівок оксиду цинку суттєво змінюється після відпалу.

Аналіз результатів розрахунку розмірів ОКР у плівках, які отримані CVD-та золь-гель-методами, свідчить, що він збільшується при підвищенні температури підкладки.

Дослідження плівок оксиду цинку, легованого алюмінієм, показує, що спостерігається зменшення середнього розміру зерен таких шарів при збільшенні концентрації домішкових атомів від 0 % до 8 %.

Топограма поверхні плівки нітриду алюмінію наведена на рис. 4. Такі плівки мають нанокристалічну структуру, з розміром зерна порядку $L = 50\text{--}100$ нм; висота нанопіків досягає $h = 8$ нм, ступінь шорсткості поверхні становить $\delta = 1,3$ нм.

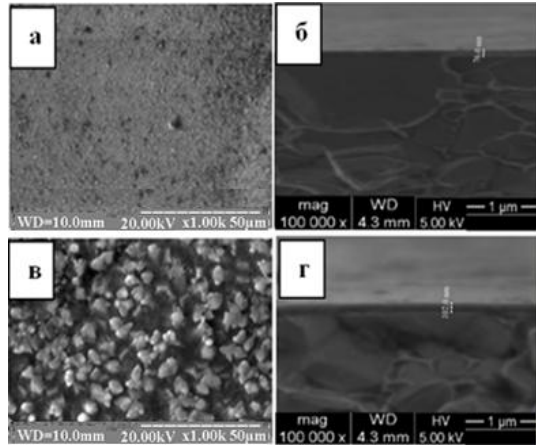


Рис. 3. Мікроструктура поверхні (а, в) та фрактограми (б, г) плівок оксиду цинку, які отримані золь-гель-методом. T_s , К: 573 (а, б); 773 (в, г)

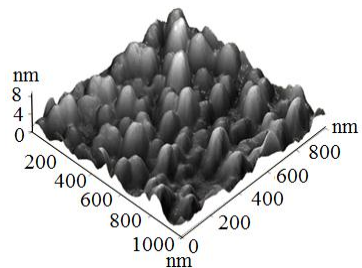


Рис. 4. Топограма поверхні плівки нітриду алюмінію на кремнієвій підкладці при $T_s = 573$ К

У *другому підрозділі* наведені результати досліджень фазового складу нелегованих плівок ZnO та AlN, з'ясовано вплив домішки алюмінію на структурні та субструктурні властивості конденсатів. На основі порівняння інтенсивності піків та їх положення за кутами дифракції 2θ (рис. 5) зі значеннями, наведеними у довіднику (JCPDS), було встановлено, що плівки ZnO мають гексагональну структуру типу вюрцит. На дифрактограмах були відсутні додаткові піки, що з точністю методу свідчить про відсутність неконтрольованих домішок у шарах. Дослідження текстури плівок свідчить, що вони мають текстуру росту [002].

Визначений період ґратки матеріалу, який становив $a = (0,3250\text{--}3266)$ нм та $c = (0,50\text{--}0,55)$ нм. При підвищенні температури одержання плівок стала a збільшувалася, а стала c зменшувалася. Розмір ОКР у плівках, отриманих методом CVD, складним чином залежав від температури підкладки, спочатку зменшуючись від 23 нм ($T_s = 575$ К) до 13 нм ($T_s = 625$ К), а потім збільшуючись до 21 нм ($T_s = 775$ К). Середній розмір ОКР також збільшувався при збільшенні часу осадження плівок (їх товщини).

Конденсати мали концентрацію дислокацій, що становила $\rho = (9\text{--}21) \cdot 10^{11}$ лін/см².

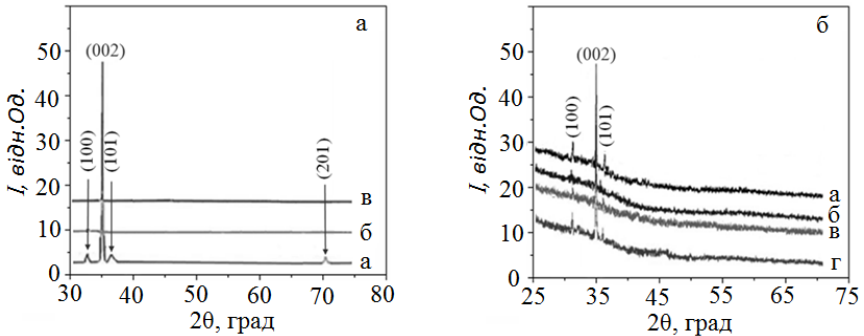


Рис. 5. Дифрактограми від плівок нелегованого (а) та легованого алюмінієм (1, 4 і 8 % – б, в, г відповідно) ZnO, які одержані методами CVD (а) та золь-гель (б)

Третій підрозділ містить результати дослідження оптичних властивостей плівок ZnO, ZnO:Al і AlN, та впливу часу їх осадження на величину коефіцієнта пропускання як функції довжини хвилі. Вплив фізико-технологічних режимів осадження на оптичні властивості плівок оксиду цинку, які отримані методом CVD, вивчався на зразках, осаджених при різних температурах підкладки ($T_s = 673, 723$ і 773 К).

Спектри пропускання та лінеаризовані залежності для визначення ширини забороненої зони матеріалу для цих зразків наведені на рис. 6. Оптична ширина

забороненої зони E_g , матеріалу становила (3,20–3,30) еВ, а при підвищенні температури підкладки її величина збільшується.

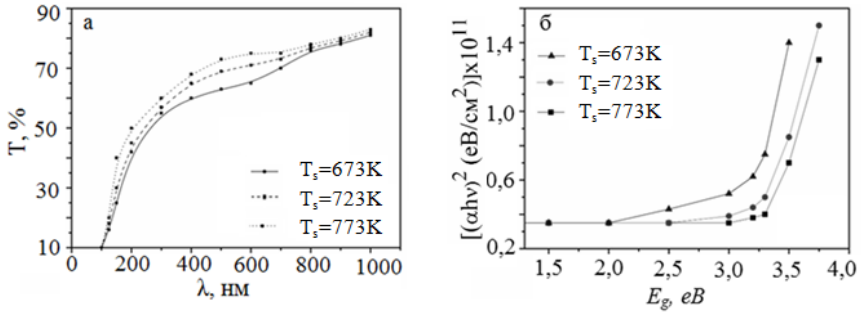


Рис. 6. Спектри пропускання (а) та ширина забороненої зони (б) плівок ZnO, отриманих при різних температурах конденсації методом CVD

Збільшення концентрації домішки алюмінію в шарах оксиду цинку викликає зміну коефіцієнта поглинання сполуки на коротких довжинах хвиль (рис. 7). Це пов'язано зі збільшенням ширини забороненої зони матеріалу, який містить алюміній.

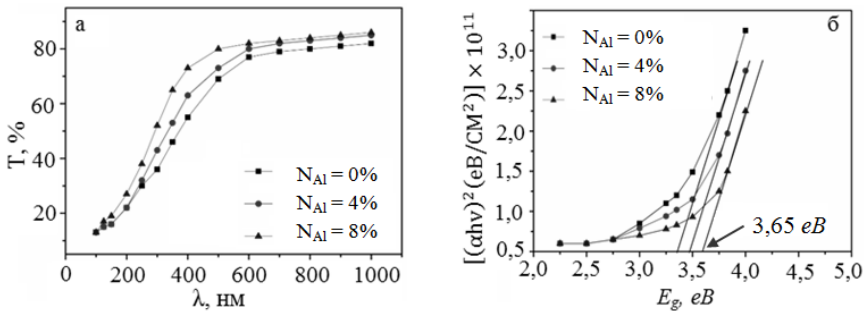


Рис. 7. Спектри пропускання (а) та ширина забороненої зони (б) плівок ZnO, легованих алюмінієм різної концентрації

Ширина забороненої зони легованого оксиду цинку $\text{ZnO}(\text{Al})$ становила $E_g = (3,25\text{--}3,65)$ еВ. Спостерігалось також збільшення E_g від 3,10 еВ до 3,20 еВ при збільшенні часу осадження плівок (їх товщини).

Четвертий підрозділ присвячений дослідженню електрофізичних властивостей плівок нітриду алюмінію та нелегованого і легованого алюмінієм оксиду цинку. Зміна величини питомого опору плівок $\text{ZnO}:\text{Al}$, які отримані при різних температурах підкладки з різною концентрацією легуючої домішки, показана на рис. 8.

Як видно з рисунка, при однаковому вмісті домішки питомий опір зразків зменшується при збільшенні температури підкладки. Це пов'язано з модифікацією кристалічної структури плівок, тобто збільшенням розміру структурних елементів плівки. Унаслідок цього зменшується розсіювання носіїв заряду на межах зерен, що призводить до зростання їх рухливості. Установлено, що при однаковій температурі отримання провідність матеріалу визначається концентрацією Al. Вона зростала при збільшенні C_{Al} до 5 %, після чого починала зменшуватися. Зменшення провідності матеріалу плівок при високій концентрації Al ($C_{Al} > 5\%$) зумовлено як зменшенням концентрації вільних носіїв заряду, так і їх рухливості.

У цьому підрозділі також наведені результати експериментального визначення характеристик СЕ на основі гетеропереходу $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ у залежності від товщини поглинаючого шару. ККД таких фотоелементів становив 5–9 %, струм короткого замикання складав $J_{sc}=(15,45\text{--}27,20)$ mA/cm^2 , напруга холостого ходу $V_{oc}=(0,43\text{--}0,46)$ В, фактор заповнення $FF=(71\text{--}75)\%$.

Закінчується підрозділ викладенням результатів дослідження частотних характеристик плівок нітриду алюмінію. Встановлено, що діелектрична проникність плівок знижується від 11,5 до 2,94 при зростанні вимірювальної частоти з 50 до 1 МГц, що пов'язано зі зміною орієнтації доменів. Пік тангенса кута діелектричних втрат спостерігався при 10 кГц і досягав 0,39. Дослідження мікротвердості свідчать про те, що плівки нітриду алюмінію зміцнюють кремнієву поверхню.

Четвертий розділ «Моделювання основних характеристик СЕ з гетеропереходом» присвячений моделюванню основних робочих характеристик СЕ з шаром оксиду цинку, він складається з чотирьох підрозділів. У першому підрозділі були проаналізовані основні вхідні характеристики матеріалів, необхідні для проведення моделювання, такі як струм холостого ходу, квантовий вихід, коефіцієнт корисної дії і т. ін.

У другому підрозділі наведені результати моделювання ВАХ СЕ $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ при різних температурах експлуатації залежно від технологічних параметрів поглинаючого та віконного шарів.

Для визначення параметрів ВАХ фотоперетворювачів були використані такі співвідношення:

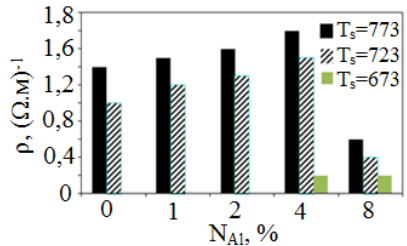


Рис. 8. Питомий опір плівок оксиду цинку, отриманих при різних температурах підкладки ($T_s = 673, 723$ і 773 К), з різною концентрацією домішки алюмінію

$$V_{xx} = A \left[\frac{kT}{q} \right] \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right), J_{SC} = \frac{I_{SC}}{S}, FF = \frac{V_m I_m}{V_{xx} I_{SC}}, \eta = \frac{FF \cdot V_{xx} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \times 100\%,$$

де S – площа СЕ; A – діодний фактор якості; I_{sc} – струм короткого замикання; J_{sc} – густина струму; V_{xx} – напруга холостого ходу; FF – фактор заповнення; η – коефіцієнт корисної дії.

Значення коефіцієнта корисної дії (ККД) η СЕ визначається як відношення вихідної потужності, що генерується СЕ до потужності падаючого на нього світлового потоку.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що значення V_{xx} і J_{sc} СЕ n -ZnO/ p -Si зростали при збільшенні товщини абсорбуючого шару. Це пов'язано з тим, що збільшення товщини шару p -Si приводить до більш ефективного поглинання світла, що, у свою чергу, збільшує кількість утворених електрон-діркових пар. Зменшення товщини абсорбуючого шару сприяє наблизенню області з високою швидкістю рекомбінації поблизу контакту до збідненої області поблизу гетеропереходу.

У *третьому підрозділі* наведені результати досліджень ВАХ СЕ на основі гетеропереходу n -ZnO/ n -CdS/ p -CIGS. Встановлено, що при освітленні СЕ з тильного боку значення J_{sc} знижується при збільшенні товщини поглинаючого шару при освітленні СЕ з тильного боку, оскільки фотони поглинаються поряд із рекомбінаційною областю поблизу контакту, далеко від області просторового заряду. Зменшення значень V_{xx} та J_{sc} призводить до зменшення коефіцієнта заповнення FF та ККД η фотоелемента. Значення V_{xx} і J_{sc} також зменшуються при збільшенні товщини шару CdS.

На рис. 9 наведені ВАХ СЕ n -ZnO/ p -Si (а) n -ZnO/ n -CdS/ p -Si та (б) з різною товщиною абсорбуючого шару Si.

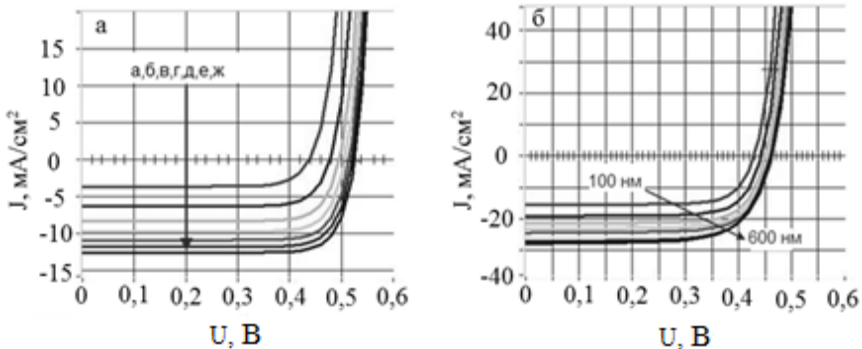


Рис. 9. Розрахункові ВАХ СЕ n -ZnO/ p -Si (а) та n -ZnO/ n -CdS/ p -Si (б) при різних товщинах абсорбуючого шару Si. : а – 0,1 мкм; б – 0,5 мкм; г – 1,5 мкм; д – 2 мкм; е – 2,5 мкм; ж – 3 мкм; n -шар $d=3$ мкм, $N_a = N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в – 1 мкм

Порівняння основних характеристик досліджених фотоперетворювачів приведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння розрахункових значень основних характеристик СЕ на основі різних гетеропереходів

Тип СЕ	$V_{ох}$, В	J_{sc} , мА/см ²	FF , %	η , %
<i>n</i> -ZnO/ <i>p</i> -Si	0,59	12,45	79,66	5,83
<i>n</i> -ZnO/ <i>n</i> -CdS/ <i>p</i> -Si	0,51	27,77	79,12	11,94
<i>n</i> -ZnO/ <i>n</i> -CdS/ <i>p</i> -CIGS	0,73	29,23	84,10	17,82
<i>n</i> -ZnO/ <i>n</i> -CdS/ <i>p</i> -CIGS-тильна	0,55	28,34	70,26	10,27
<i>n</i> -ZnO/AlN/ <i>p</i> -Si	0,53	17,31	79,09	7,25

Четвертий підрозділ присвячений визначенню основних характеристик СЕ на основі гетеропереходу *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-CIGS при його освітленні з фронтального та тильного боків. Показано, що при освітленні фронтальної сторони потоку світла необхідно проходити через віконний і буферний шари. Це призводить до втрати фотонів в абсорбованому шарі. Зі збільшенням товщини абсорбуючого шару CIGS зростає ефективність СЕ завдяки більшій ймовірності поглинання довгохвильових фотонів. При освітленні з тильного боку падаюче світло поглинається в основній частині абсорбуючого шару поряд з високорекомбінаційною областю контакту до тильної поверхні.

П'ятий підрозділ присвячений аналізу результатів моделювання параметрів СЕ *n*-ZnO/CdS/*p*-Si. Наведені вольт-амперні характеристики, отримані за допомогою програми SCAPS. Коли товщина адсорбуючого шару зростає від 100 нм до 600 нм – ефективність перетворення енергії зростає від 6 % до 9 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було проведено комплексне дослідження морфології поверхні, структурних, оптичних, електрофізичних властивостей та елементного складу плівок ZnO, AlN і ZnO, легованих алюмінієм, отриманих при різних режимах осадження. У результаті були сформульовані такі узагальнювальні висновки:

1. Плівки ZnO, AlN і ZnO, що леговані алюмінієм та отримані методами CVD, золь-гель-методом і методом магнетронного розпилення, є полікристалічними та мають високу адгезію до підкладки. При цьому:

- плівки ZnO і ZnO, леговані алюмінієм, характеризуються розмірами ОКР 24,0 нм і 22,4 нм відповідно, параметри ґратки ZnO становлять $a = 0,3249$ нм, $c = 0,5206$ нм, а для ZnO, легованого алюмінієм, з концентрацією до 8 % – $a = 0,3253$ нм, $c = 0,5209$ нм;
- при підвищенні температури підкладки від 623 до 773 К спостерігалася зміна механізму росту плівок від пошарового до стовпчастого з аксіальною текстурою росту конденсатів;
- середній розмір зерна при підвищенні температури нанесення збільшувався від 0,1 до 1,5 мкм.

2. Дослідження оптичних характеристик плівок показали, що шари ZnO мають високий коефіцієнт пропускання (близько 75–80 %). Це свідчить про те, що така сполука може бути успішно використана як віконний шар у СЕ. Показано, що при підвищенні температури підкладки до 773 К відбувається збільшення значення оптичної ширини забороненої зони E_g від 3,20 до 3,30 еВ, а легування алюмінієм дає відповідні значення – від 3,25 до 3,65 еВ.

3. Показано, що для отримання високотекстурованих структурно досконалих полікристалічних плівок ZnO, ZnO:Al та AlN з низьким рівнем відбивання світла, які можуть бути використані для створення високоефективних СЕ, були використані такі методи:

- метод CVD (хімічне осадження з газової фази);
- золь-гель-метод;
- метод магнетронного розпилення.

Найкращі значення структурних та оптичних характеристик були одержані при отриманні плівок сполук методом CVD: $T_s = 773$ К; $E_g = 3,3$ еВ – ZnO; $T_s = 773$ К; $E_g = 3,65$ еВ; $N = 8$ % – ZnO:Al; $v = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $t = 30$ хв. Такий ефект можна пояснити встановленням оптимальних термодинамічних умов, близьких до термодинамічно рівноважних.

4. Уперше було запропоновано та реалізовано моделювання гетеросистем n -ZnO/ p -Si, n -ZnO/ n -CdS/ p -CIGS, n -ZnO/ n -CdS/ p -Si та n -ZnO/AlN/ p -Si, проведено порівняння розрахункових та експериментальних результатів. Показано, що розроблений СЕ на основі нітриду алюмінію (n -ZnO/AlN/ p -Si) порівняно із СЕ, розробленим на основі оксиду цинку, має більший ККД (7,25 %), що свідчить про перспективність запропонованої конструкції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Физико-химические и механические свойства наноструктурных нитридных покрытий / [В. М. Береснев, О. В. Соболев, Д. А. Колесников, А. К. М. Мухаммед] // Металлофиз. новейшие технол. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 139–160.

2. Pogrebnjak A. D. Structural, optical and electrical properties of ZnO:Al thin film / [A. D. Pogrebnjak, N. Y. Jamil, **A. K. M. Muhammed**] // Physical Surface Engineering. – 2011 – Vol. 3, № 9. – P. 244–249.

3. Pogrebnjak A. D. Effects of Al doping on the structural and optical properties of ZnO thin film deposited by (CVD) / [A. D. Pogrebnjak, N. Y. Jamil, **A. K. M. Muhammed**] // Visnyk KhNU. – 2011. – Vol. 962, № 15. – P. 58–62.

4. Pogrebnjak A. D. Effect deposition time and substrate temperature on optical properties of ZnO thin film / [A. D. Pogrebnjak, N. Y. Jameel, **A. K. M. Mohammed**] // Physical Surface Engineering. – 2011. – Vol. 1, № 9. – P. 4–7.

5. Pogrebnjak A. D. Simulation study of effects, operating temperature and layer thickness on thin film CIGS solar cell performance / [A. D. Pogrebnjak, **A. K. M. Muhammed**] // J Nano. Electron. Phys. – 2011. – Vol. 4, № 3. – P. 51–58.

6. Pogrebnjak A. D. Simulation of the front and rear side illumination of the CdS/CIGS thin film solar cell / [A. D. Pogrebnjak, L. S. Rasheed, **A. K. M. Muhammed**] // Phys. Res. Surf. – 2011. – Vol. 9, № 4. – P. 390–394.

7. Jamil N. Y. Simulation study of *n*-ZnO/*p*-Si heterojunction solar cell / [N. Y. Jamil, **A. K. M. Muhammed**] // Naukovyi Visnyk Budivnytstva. – 2011. – Vol. 65. – P. 439–445.

8. Pogrebnjak A. D. Structural and optical properties of ZnO prepared by CVD before and after annealing / [A. D. Pogrebnjak, N. Y. Jamil, **A. K. M. Mohammed**] // Metallofiz. Noveishie Tekhnol – 2011 – V.33 – P. 235-241

9. Кульментьева О. П. Структурно-фазовое состояние и оптические свойства покрытий из ZnO / [О. П. Кульментьева, **А. К. М. Мухаммед**] // Ж. нано- и электрон. физ. – 2010. – Т. 4, № 2. – С. 82–89.

10. Pogrebnjak A. D. Electrical and optical properties of ZnO:Al films prepared by chemical vapor deposition (CVD) / [A. D. Pogrebnjak, **A. K. M. Mohammed**] // Proceedings of 1st International conference “Nanomaterials: Applications & properties” (NAP-2011). – Ukraine, Crimea, Alushta, Sptember 27–30, 2011. – P. 226–232.

2. Наукові праці апробаційного характеру

11. Структура и свойства поверхности нанокристаллических покрытий / [О. П. Кульментьева, **А. К. М. Мухаммед**, А. И. Кульментьев [и др.] // VII Междунар. конференция «Рентгеновское, синхротронное излучение, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов, нано-био-инфо-когнитивные технологии» (Российская Федерация, Москва, 16–21 ноября 2009 г.). – Москва, 2009. – С. 255.

12. Талалай Е. А. Вивчення структури сонячних елементів / [Е. А. Талалай, **А. К. М. Мухаммед**] // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій (Суми, 21–24 квітня 2009 р.). – Суми : СумДУ, 2009. – С. 64.

13. Pogrebnjak A. D. Study properties of thin film ZnO by (CVD) before and after annealing / [A. D. Pogrebnjak, N. Y. Jamil, **А. К. М. Mohammed**] // 7th International conference “New electrical and electronic technologies and their industrial implementation” (Zakopane, Poland, June 28 – July 1, 2011). – Zakopane, 2011. – P. 121.

14. Pogrebnjak A. D. Effects of Al doping on optical properties of ZnO thin films deposited by (CVD) / [A. D. Pogrebnjak, **А. К. М. Mohammed**] // Materials of Teachers, PhD students, Associates and students Conference faculty of electronics and information technologies SSU (Sumy, 21–24 April, 2011). – Sumy : Sumy State University, 2011. – P. 26.

15. Pogrebnjak A. D. Effects deposition time and substrate temperature on optical properties of ZnO thin film prepared by (CVD) / [A. D. Pogrebnjak, **А. К. М. Mohammed**] // Materials of Teachers, PhD students, Associates and students Conference faculty of electronics and information technologies (Sumy, 21–24 April, 2011). – Sumy : Sumy State University, 2011. – P. 27.

АНОТАЦІЯ

Мухаммед А. К. М. Структурні та оптичні властивості сонячних елементів на основі плівок ZnO та AlN. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів та систем. – Сумський державний університет, Суми, 2012.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню морфології поверхні, структурно-фазового стану, оптичних та електрофізичних властивостей плівок ZnO та AlN, які отримані методами CVD, золь-гель та магнетронним розпиленням, проведено моделювання ВАХ СЕ на основі гетеропереходів *n*-ZnO/*p*-Si, *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-Si, *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-CIGS та визначені їх оптимальні фізичні та конструкційні характеристики.

Проведено комплексне дослідження структури та субструктури полікристалічних плівок ZnO (ZnO:Al) та AlN залежно від фізико-технологічних умов їх конденсації. Встановлені режими отримання високоякісних конденсатів сполуки, придатних для використання у приладобудуванні.

Вивчення електрофізичних властивостей шарів засвідчило, що при підвищенні легування плівок ZnO алюмінієм електропровідність плівок підвищувалася, а питомий опір відповідно зменшувався. Крім того, були

чисельно виміряні основні електрофізичні властивості гетеропереходу $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$. Проведене чисельне моделювання основних електрофізичних характеристик гетеросистем на основі ZnO, був визначений коефіцієнт корисної дії для кожного з переходів. Вивчений вплив таких параметрів, як товщина поглинального шару, температура конденсації, тип поглинального шару, на поведінку вольт-амперних характеристик та квантового виходу гетеросистем.

Було запропоновано та реалізовано моделювання гетеросистем $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-ClGS}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-Si}$ та $n\text{-ZnO}/\text{AlN}/p\text{-Si}$. Проведено порівняння модельних та експериментальних результатів.

У результаті проведених експериментальних досліджень були визначені оптимальні режими отримання плівок ZnO та AlN, проведений структурно-фазовий аналіз, досліджені оптичні та електрофізичні властивості бездомішкових та легованих алюмінієм плівок оксиду цинку. При порівнянні експериментальних результатів та моделювання було визначено, що введення шару AlN у конструкцію SE покращує його характеристики.

Ключові слова: напівпровідникові плівки, оксид цинку, нітрид алюмінію, структура, оптичні властивості, гетеропереходи, вольт-амперні характеристики, сонячні елементи.

АННОТАЦІЯ

Мухаммед А. К. М. Структурные и оптические свойства солнечных элементов на основе пленок ZnO и AlN. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2012.

Диссертационная работа посвящена исследованию морфологии поверхности, структурно-фазового состояния, оптических и электрофизических свойств пленок ZnO и AlN, полученных методами CVD, золь-гель и магнетронным распылением. В работе также было проведено моделирование ВАХ солнечных элементов на основе оксида цинка.

Проведено комплексное исследование, структуры и субструктуры поликристаллических пленок ZnO (ZnO:Al) и AlN в зависимости от физико-технологических условий их конденсации.

Установлены режимы в температурном интервале от 573 до 773 К получения высококачественных конденсатов соединения. Показано, что при повышении температуры конденсации качество пленок заметно возрастает, улучшается их текстура, размер зерна и т. д. Кроме того, полученные в работе пленки ZnO имеют преимущественную текстуру роста (002).

Исследование оптических свойств конденсатов показало, что при повышении концентрации алюминия в пленках существенно повышается

оптическая ширина запрещенной зоны от 3,25 до 3,65 эВ, что в дальнейшем имеет перспективу применения данного соединения в качестве оконного слоя в тандемных солнечных элементах.

Изучение электрофизических свойств слоев показало, что при повышении легирования пленок ZnO алюминием электропроводимость пленок повышалась, а удельное сопротивление соответственно уменьшалось.

Кроме того, были численно измерены основные электрофизические свойства гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$, такие, как ток короткого замыкания, коэффициент заполнения, коэффициент полезного действия и т. д.

Было предложено и реализовано моделирование гетеросистем $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$, $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-Si}$ и $n\text{-ZnO}/\text{AlN}/p\text{-Si}$.

Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных результатов.

Проведено численное моделирование основных электрофизических характеристик гетеросистем на основе ZnO, был определен коэффициент полезного действия для каждого из переходов.

Изучено влияние таких параметров, как толщина поглощающего слоя, температура конденсации, тип поглощающего слоя на поведение вольт-амперных характеристик и квантового выхода гетеросистем.

Проведено сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования, проведена их корреляция. Установлено, что при повышении концентрации алюминия в пленках ZnO ширина запрещенной зоны материала значительно повышается, поэтому такие слои имеют перспективу использования в качестве оконных слоев солнечных элементов.

При сравнении экспериментальных результатов и моделирования было определено, что внедрение слоя AlN в конструкцию СЭ улучшает его характеристики.

Установлены режимы получения высококачественных конденсатов соединения, пригодных для использования в приборостроении.

Ключевые слова: полупроводниковые пленки, оксид цинка, нитрид алюминия, структура, оптические свойства, гетеропереходы, вольт-амперные характеристики, солнечные элементы.

SUMMARY

Muhammed A. K. M. Structural and optical properties of solar cells, based on ZnO and AlN films. – Manuscript.

The thesis for the candidate of physical and mathematical sciences on the speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Elements, and Systems. – Sumy State University, Sumy, 2012.

The thesis focuses on investigation of surface morphology, structural and phase state, optical and electro physical properties of ZnO and AlN films, obtained by the following methods: CVD, sol gel, and magnetron sputtering.

In this work a modeling of current-voltage characteristics of solar cells based on ZnO was also carried out.

In the work the complex investigation of structure and substructure features of polycrystalline ZnO (ZnO:Al) and AlN films was performed.

There were determined the modes for obtainment of high-quality compound condensates that can be used in instrument engineering. It was shown that the increase of condensation temperature leads to the increase of film quality, improvement of their texture, grain size etc. Furthermore, the obtained ZnO films have the preferred growth texture (002).

The investigation of film electro physical properties showed that the increase of doping of ZnO films by aluminum leads to increase of electrical conductivity, and to decrease of specific resistance. Furthermore, there were defined the basic electrophysical properties of *n*-ZnO/*p*-Si, hetero junction.

During investigation there was proposed and realized a modeling of *n*-ZnO/*p*-Si, *n*-ZnO/*n*-CdS /*p*-CIGS, *n*-ZnO/*n*-CdS/*p*-Si and *n*-ZnO/AlN/*p*-Si hetero systems. The modeling and experimental results were compared.

As a result of conducted experimental researches the optimal modes of ZnO and AlN film obtaining were determined, a structure-phase analysis was carried out, optical and electro physical properties of pure and aluminum-doped ZnO films were investigated. While comparing the modeling and experimental results there was determined that implementation of AlN film into the solar cell structure improves its characteristics. It was defined, that the increase of Al concentration ZnO films leads to the increase of band gap of the material, so that such layers can be used as window layers in solar cells.

Key words: semiconductor films, zinc oxide, nitride aluminum, structure, optical properties, hetero junctions, I-V curves, solar cells.

Підписано до друку .11.2012.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,2. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.