

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Ковтун Назар Анатолійович

УДК 621.383:537.221

**Структура, оптичні і електричні властивості плівок оксиду цинку, виготовлених  
методом магнетронного розпилення**

**01.04.07 - фізика твердого тіла**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

Харків 2005

**Дисертацією є рукопис**

**Робота виконана** у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник** - доктор фізико-математичних наук, професор

**Бойко Борис Тимофійович,**

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Мацевітий Володимир Михайлович,** Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

**Богдан Михайло Михайлович,** Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, провідний науковий співробітник.

**Провідна установа** - Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України (відділ іонно-плазмової обробки матеріалів).

Захист відбудеться “\_14\_” листопада 2005 року о 16\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01 при Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків, за адресою: 61003, м. Харків, вул. Гамарника, 2, корпус У-3 НТУ „ХП”, ауд. 204.

Відзиви на автореферат можна надсилати за адресою: 61002, м. Харків, вул. Чернишевського, 28 а/с 8812.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою:

61024 м. Харків, вул. Гуданова, 13.

Автореферат розіслано “\_10\_” жовтня 2005 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01

кандидат фізико-математичних наук

Литвиненко В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

При розробці сучасних оптоелектронних виробів, таких як фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії, фотодіоди, фототранзистори, активні елементи дисплеїв і т.п., використовуються прозорі електроди, що представляють собою плівки широкозонних вироджених напівпровідникових матеріалів. Такі плівки повинні мати високий коефіцієнт пропускання у видимому діапазоні ( $T_{400-800}$ ) та мінімальний поверхневий електроопір ( $R_{\square}$ ). Існують значні труднощі в одночасній реалізації таких властивостей, тому коефіцієнтом якості прозорих електродів ( $\Phi$ ) вибирають таке співвідношення:

$$\Phi = T_{400-800}^{10} / R_{\square} \quad (1)$$

Одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для формування прозорих електродів є леговані шари оксиду цинку. Це обумовлено тим, що багатьма дослідниками в лабораторних умовах отримані плівки оксиду цинку з високими значеннями коефіцієнту якості такими високотехнологічними методами, як реактивне і нерективне магнетронне розпилення на постійному струмі, нерективне високочастотне магнетронне розпилення. Не зважаючи на те, що в даний час для кожного виду магнетронного розпилення ідентифіковані основні технологічні параметри, що дозволяють отримувати прозорі леговані плівки оксиду цинку з оптимальними оптичними та електричними властивостями, значення цих параметрів варіюються в широких інтервалах. Це приводить до того, що проведена оптимізація фізико-технологічних режимів не може бути використана при розробці широкомасштабної промислової технології. Таким чином, вихідним етапом створення промислових технологій одержання прозорих електродів є встановлення фізичних механізмів впливу технологічних параметрів магнетронного розпилення на оптичні й електричні властивості легованих плівок оксиду цинку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася на кафедрі фізичного матеріалознавства для електроніки і геліоенергетики відповідно до 3 планових завдань науково-дослідного відділу Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: “Розробити сонячні модулі на основі плівкових та гібридних фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) з к.к.д. до 10% для використання їх в ролі відновлюваних джерел енергії“ (1994-1996 р., ДРН 0195U0014005), “Фізичні основи одержання металевих та напівпровідникових плівкових матеріалів для електроніки та геліоенергетики“ (1997-1999 р., ДРН 0197U001907), “Фізичні основи стабілізації оптичних і фотоелектричних властивостей та ефективності роботи фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії на основі багатошарових композицій з напівпровідникових, діелектричних та металевих плівок“ (2000-2002 г., ДРН 0197U002009), а також в рамках 2 міжнародних проектів:

“Highly Efficient Thin Film Solar Cells Based on Chalcogenide Semiconductors” (1997-1998, Contract INTAS –94-3998), “Preparation Chalcopyrite Thin Film and Solar Cells by Activated Deposition Method” (1997-1999, Contract INTAS – 96-0206) та двох особистих грантів: “Preparation of transparent conductive layers ZnO:Al by magnetron sputtering on a direct current and investigation of their optical and electrical properties” (1999-2000, Contract INTAS – 96-0206), “Untersuchung der strukturellen, elektrischen und optischen Eigenschaften von polykristallinen ZnO:Al-Schichten.” (2001, Contract DAAD).

**Мета і задача дослідження.** Метою даної роботи є розробка фізичних основ оптимізації фізико-технологічних умов різних видів магнетронного розпилення для одержання легованих шарів оксиду цинку з високими коефіцієнтами якості. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалася **задача** встановлення фізичних механізмів і закономірностей впливу технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилення на критерії якості легованих шарів оксиду цинку. При рішенні поставленої задачі було необхідно:

1. Визначити вплив технологічних параметрів реактивного магнетронного розпилення при постійному струмі на фазовий склад і параметри кристалічної структури, оптичні й електричні властивості легованих плівок оксиду цинку.

2. Виявити вплив виду і концентрації легуючої домішки на фазовий склад і параметри кристалічної структури, оптичні й електричні властивості плівок оксиду цинку, отриманих відповідно реактивним і нереактивним магнетронним розпиленням.

3. Встановити закономірності синтезу легованих плівок оксиду цинку, отриманих нереактивним магнетронним розпиленням, що визначають їхній фазовий склад і параметри кристалічної структури, оптичні й електричні властивості.

4. Визначити вплив технологічних параметрів височастотного реактивного магнетронного розпилення на фазовий склад і параметри кристалічної структури, оптичні й електричні властивості легованих плівок оксиду цинку.

5. На основі встановлених фізичних механізмів і закономірностей провести оптимізацію технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилення для одержання легованих плівок оксиду цинку з високими коефіцієнтами якості.

Для виділення фізичних-механізмів впливу власних крапкових дефектів, рівня мікро-деформації, розміру області когерентного розсіювання, ступеню розсіювання текстури, виду і концентрації легуючої домішки на оптичні та електричні властивості плівок ZnO:In и ZnO:Al в роботі застосовувався наступний комплексний підхід – разом аналізувались оптичні, електричні властивості та параметри кристалічної структури легованих та нелегованих плівок оксиду цинку, отриманих в аналогічних технологічних режимах осадження.

**Об'єктом дослідження** є фізичні механізми впливу фізико-технологічних умов магнетронного розпилення на оптичні та електричні характеристики легованих плівок оксиду цинку.

**Предметом дослідження** є структура, оптичні й електричні характеристики плівок ZnO:In, ZnO:Al, ZnO отриманих різними видами магнетронного розпилення.

Вирішення поставлених задач здійснювалося шляхом застосування наступних **методів дослідження**: рентгендифрактометричного аналізу фазового складу і таких параметрів кристалічної структури, як розмір області когерентного розсіяння, рівня мікродеформації і ступеню розсіювання текстури; оптичної спектроскопії для визначення середнього коефіцієнту пропускання шарів у діапазоні довжин хвиль (400-800) нм; чотирьохзондового методу для ідентифікації поверхневого електроопору шарів, методу е.р.с. Холу для визначення концентрації і рухливості основних носіїв заряду.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Шляхом порівняльного аналізу кристалічної структури, оптичних і електричних властивостей плівок ZnO:In, ZnO:Al, ZnO, встановлені фізичні механізми впливу технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилення на коефіцієнт якості легованих плівок оксиду цинку.

2. Вперше доведено, що досягнення оптимальних оптоелектричних властивостей плівок ZnO:In, отриманих реактивним магнетронним розпиленням на постійному струмі забезпечується за рахунок формування релаксованого структурного стану, при якому в матрицю фази оксиду цинку когерентно включені фрагменти фази  $Zn_3In_2O_6$ .

3. Вперше експериментально доведено, що формування фази  $Zn_3Al_2O_6$  не забезпечує отримання оптимальних оптоелектричних властивостей плівок ZnO:Al, оскільки утворення цієї фази супроводжується зменшенням концентрації атомів алюмінію в електрично активному стані.

4. Вперше ідентифікована нетрадиційна зміна фізичних закономірностей впливу товщини плівок ZnO:Al на значення концентрації основних носіїв заряду при високочастотному нереактивному магнетронному розпиленні зі збільшенням робочого тиску.

5. Уточнені та обґрунтовані фізичні механізми впливу концентрації легуючої фази у складі мішені при нереактивному магнетронному розпиленні на постійному струмі на оптоелектричні властивості плівок ZnO:Al.

#### **Практичне значення.**

1. Розроблені та реалізовані фізичні принципи оптимізації технологічних параметрів реактивного магнетронного розпилення при постійному струмі, що забезпечує отримання

стабільних плівок ZnO:In і ZnO:Al з коефіцієнтом якості, який відповідає світовим аналогам для цього типу розпилення:  $\Phi_{\text{ZnO:In}}=1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$  і  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=9.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ .

2. Встановлені та реалізовані фізичні принципи оптимізації технологічних параметрів нереактивного магнетронного розпилення при постійному струмі, що забезпечує отримання стабільних плівок ZnO:Al із коефіцієнтом якості, який відповідає світовим аналогам для цього типу магнетронного розпилення:  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=3.4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ .

3. Розроблені та реалізовані фізичні принципи оптимізації технологічних параметрів нереактивного високочастотного магнетронного розпилення, що забезпечили отримання плівок ZnO:Al із рекордним коефіцієнтом якості -  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=1.4 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}^{-1}$ . При цьому також було досягнуто рекордно низького для плівок ZnO:Al питомого електроопору -  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

4. Оптимізовані фізико-технологічні режими реактивного та нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі для отримання плівок ZnO:Al були запровадженні у Державному підприємстві „Рубін” ННЦ ХФТІ НАН України та в ТОВ „Харківська електротехнічна компанія”, що дозволило отримати прозорі електроди для сучасних конструкцій фотодіодів та фототранзисторів з низьким контактним електроопором.

5. В межах двох міжнародних проектів INTAS – 96-0206 та Contract DAAD 2001, які виконувались у Штутгартському Університеті Інституті фізичної електроніки (Німеччина) були використані, в конструкціях тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), плівки ZnO:Al з  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=3.4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ , отримані методом нереактивного високочастотного магнетронного розпилення. Їх застосування дозволило підвищити к.к.д. таких ФЕП до 16 %.

6. Дані про фізичні механізми впливу технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилення були запровадженні в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України при розробці сервісних шарів приладових структур оптоелектроніки.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети і задачі дослідження, а також аналіз та обговорення отриманих результатів виконувались спільно з науковим керівником. Автор виконав аналітичний аналіз сучасного стану фізичних процесів отримання плівок ZnO методами магнетронного розпилення, йому належить вибір методів досліджень, обробка та узагальнення результатів. Здобувачем безпосередньо розроблені і реалізовані технологічні режими: реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі плівок ZnO:In, ZnO:Al і ZnO; нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі плівок ZnO:Al і ZnO; високочастотного нереактивного розпилення плівок ZnO:Al і ZnO. Виконані дослідження поверхневого і питомого електроопору цих шарів; визначені концентрація і рухливість основних носіїв заряду в отриманих шарах; досліджено спектральні залежності коефіцієнта пропускання цих шарів. Здобувач брав участь у підготовці матеріалів до публікації,

представлення результатів на конференціях. Автор брав безпосередньо участь у впровадженні розробок на Державному підприємстві „Рубін” ННЦ ХФТІ НАН України, в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України, а також у Штутгартському Університеті Інституті фізичної електроніки (Німеччина).

**Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:**

третьому міжнародному симпозиумі “Вакуумні технології й устаткування”, Харків, Україна, 22-24 вересня, 1999; VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”, Харків, Україна, 24-25 травня 2000; XI Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”, "MICROCAD-2001-Kharkov" Харків, Україна, 14-16 травня, 2001; Seminar IPE-2001 Stuttgart Universität, Germany, 27 November 2001; V Международной конференции “Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении”. 3-5 октября 2004, г. Воронеж, Россия.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 8 наукових праць, в тому числі 2 статті без співавторів.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'ятих розділів, висновку, списку використаних джерел (105 джерела). Вона містить 157 сторінок основного тексту, включає 27 таблиць і 40 рисунків.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність обраної теми дослідження, сформульована мета роботи і визначені задачі дослідження, відображені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі**, присвяченому огляду літературних даних, зібрана і систематизована інформація про вплив фізико-технологічних умов магнетронного розпилення на кристалічну та енергетичну структуру, оптичні та електричні властивості плівок ZnO, ZnO:Al, ZnO:In. Проведений аналіз дозволив встановити, що при реактивному магнетронному розпиленні при постійному струмі критичними технологічними параметрами для одержання легованих шарів оксиду цинку з високими коефіцієнтами якості є температура осадження і швидкість подачі кисню. Встановлено, що при температурах осадження ( $T_n$ ) нижче 200°C неможливо одержати прозорі і електропровідні шари оксиду цинку. При нереактивному магнетронному розпиленні на постійному струмі оптичні й електричні властивості легованих шарів оксиду цинку визначаються температурою осадження. При нереактивному височастотному розпиленні одержання шарів оксиду цинку з високими коефіцієнтами якості можливо без нагрівання підкладки. При цьому основними технологічними параметрами, які визначають їх оптичні й електричні властивості, є тиск аргону (P) і потужність магнетрону ( $P_w$ ).

**У другому розділі** описані методики виготовлення і дослідження кристалічної структури, оптичних та електричних властивостей плівок ZnO:In, ZnO:Al, ZnO, які отримувалися реактивним та нереактивним магнетронним розпиленням на скляних підкладках. Полікристалічні плівки оксиду цинку були отримані на сучасних вакуумних установках „Ardene” и „GIT” у Штутгартському Університеті (Німеччина), оснащених турбомолекулярними насосами. Ідентифікація фазового складу плівок проводилася рентгендифрактометричним методом на установці “Variant” (Штутгартський Університет (Німеччина)) та на кафедрі ФМЕГ (НТУ „ХПІ”). Дослідження розмірів областей когерентного розсіяння (L) і рівня мікродеформації ( $\epsilon$ ) здійснювалось по ширині дифракційних максимумів методом апроксимацій. Також досліджувався ступень розсіювання текстури ( $\psi$ ). Дослідження елементного складу виготовлених шарів ZnO:Al здійснювалося методом рентгенівського флюорисцентного аналізу. Атестація електричних властивостей плівок оксиду цинку здійснювалась по значенню поверхневого електроопору ( $R_{\square}$ ) та питомого електроопору ( $\rho$ ). Для вимірювання  $R_{\square}$  використовувався найбільш достовірний і експресний метод – чотирьох-зондовий. Концентрація (n) і рухливість ( $\mu$ ) основних носіїв заряду в плівках визначалися методом e.p.c. Холу. Атестація оптичних властивостей плівок проводилася шляхом спектрометричних досліджень коефіцієнту пропускання з використанням двохканального спектрофотометру “Scan”, з розрахунком його середнього значення ( $T_{400-800}$ ) у спектральному діапазоні (400-800) нм.

Оптичні та електричні властивості плівок, які обумовлюються кристалічною та енергетичною структурою залежать від фізико-технологічних умов конденсації плівок, серед яких найсуттєвішими являються швидкість росту та умови кристалізації. Ці фізичні параметри в свою чергу залежать від таких технологічних умов магнетронного розпилення, як потужність магнетрону, робочий тиск аргону, швидкість відкачки, відстань між магнетроном та підкладкою, виду магнетронного розпилення та температура підкладки. Тому, змінюючи один з перерахованих технологічних параметрів в широких інтервалах, при зафіксованих інших можливо, проаналізував зміни оптоелектричних властивостей та параметрів структури, встановити фізичні механізми відповідні за отримання плівок оксиду цинку з високими критеріями якості.

**У третьому розділі** “Вплив технологічних параметрів процесу синтезу на властивості легованих плівок оксиду цинку, отриманих реактивним розпиленням при постійному струмі” приведені результати дослідження фізичних механізмів впливу швидкості напуску кисню, температури осадження, виду легуючої домішки і режимів термообробки на оптоелектричні властивості плівок ZnO:In і ZnO:Al. При одержанні плівок ZnO:In(Al) використовувалися мішені, що містять 98 ат.% Zn та 2 ат.% In (Al). Для точного варіювання концентрації кисню при синтезі плівок оксиду цинку застосовувалися два балони, один із яких містив аргон, інший - 99



об.% аргону і 1 об.% кисню. При одержанні плівок оксиду цинку варіювалася швидкість подачі аргон-кисневої суміші з другого балона  $V_{(Ar+O)}$  при фіксованій швидкості відкачки. Згідно з літературним даним, для того, щоб процес синтезу оксиду цинку лімітувався тільки лише швидкістю подачі кисню, температура осадження повинна складати  $400^{\circ}\text{C}$ , при цьому питома потужність магнетрону ( $0.6 \text{ Вт/см}^2$ ) і робочий тиск ( $4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ ) повинні бути мінімально можливими для стійкої роботи магнетрону. Вихідний вакуум ( $1 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$ ) створювався турбомолекулярним насосом, що забезпечує однакову швидкість відкачки кисню й аргону.

Дослідження показали, що максимальне значення  $\Phi = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$  спостерігалось при  $V_{(Ar+O)} = 24 \text{ см}^3/\text{с}$ . На залежностях  $T_{400-800}$ ,  $n$ ,  $\mu$  від  $V_{(Ar+O)}$  (рис. 1) можна виділити кілька характерних інтервалів зміни оптоелектричних властивостей. При  $V_{(Ar+O)} < 16 \text{ см}^3/\text{с}$  властивості плівок ZnO:In n-типу електропровідності, які характеризуються низьким значеннями  $\mu$ ,  $T_{400-800}$  і високим  $n$ , контролюються електрично активними власними крапковими дефектами донорного типу (вакансіями кисню ( $V_o$ ) і міжвузловими атомами цинку ( $Zn_i$ )), а не концентрацією індію. Дійсно, експериментально було показано, що при  $V_{(Ar+O)} < 16 \text{ см}^3/\text{с}$  значення величини  $n$  у плівках ZnO (у яких відсутня домішка індію) і ZnO:In збігається (рис.1). В наслідок цього для ZnO так і ZnO:In значення  $T_{400-800}$  обмежується за рахунок неособистого поглинання світла на вказаних структурних дефектах,  $\mu$  знижується в результаті інтенсифікації процесу розсіювання основних носіїв заряду на цих структурних дефектах.

Рис. 1. Залежності оптоелектричних параметрів плівок ZnO:In від швидкості напуску аргон-кисневої суміші розміру періоду уздовж осей  $a$  і  $b$  з ґратко уздовж осі  $c$ . В цій фазі атоми In займають від кисню.

↑  
I,  
імп./с

а)

б)

Відповідно до результатів елементного аналізу в плівках ZnO:In концентрація In ( $C_{In}$ ) складає  $1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . При  $V_{(Ar+O)} > 20 \text{ см}^3/\text{с}$   $n$  істотно нижче  $C_{In}$ , внаслідок чого значна частина атомів індію в плівках ZnO:In знаходиться в електрично неіонізованому стані. Таким чином, у досліджуваних зразках знову відбувається процес упорядкування твердих розчинів, при якому виникають релаксовані структурні стани. Принципово можливо три варіанти формування релаксованих структурних станів: хаотична двофазна суміш кристалів ZnO і  $Zn_3In_2O_6$ , формування поверхневого шару  $Zn_3In_2O_6$  на шарі ZnO, або утворення змішаних кристалів, коли фрагменти однієї фази (у даному випадку  $Zn_3In_2O_6$ ) у матриці іншої фази (у даному випадку ZnO) утворюють монолітний монокристал. З енергетичної точки зору найбільш термодинамічно вигідним є третій варіант. Указаний процес

Рис. 2. Рентгенограми плівок ZnO:In (а) и ZnO:Al (б) (в випромінюванні Со-анода).

двофазним: тривимірною областю катіонної підґратки фази ZnO перемежується з тривимірними областями катіонної підґратки фази  $Zn_3In_2O_6$ . Якщо відповідні “гетерофазні” фрагменти досить протяжні, то дифракційні спектри містять ознаки обох “фаз”. Слідством утворення фази упорядкування є зниження мікрдеформації у системі, що і спостерігалось експериментально. При збільшенні  $V_{(Ar+O)}$  з  $16 \text{ см}^3/\text{с}$  до  $20 \text{ см}^3/\text{с}$  значення  $\epsilon$  знижується більш ніж у два рази з  $0.75 \cdot 10^{-3}$  до  $0.30 \cdot 10^{-3}$ . При цьому  $L$  практично не змінювався і складав біля  $900 \text{ \AA}$ , що побічно свідчить про відсутність як поверхневого положення  $Zn_3In_2O_6$ , на шарі ZnO, так і їх хаотичної суміші. Упорядкування твердого розчину і зниження концентрації домішки на зернограничній поверхні шляхом утворення фази  $Zn_3In_2O_6$ , яка когерентно з'єднується з фазою ZnO, викликають експериментально виявлене зростання рухливості основних носіїв заряду. При  $V_{(Ar+O)} > 30 \text{ см}^3/\text{с}$  збільшення концентрації фази  $Zn_3In_2O_6$ , яке якісно спостерігається експериментально, відбувається не тільки за рахунок зниження концентрації атомів In в електрично не активному стані, але і за рахунок зниження концентрації атомів In в електрично активному стані. Це викликає зниження  $n$  (рис.1).

При незмінній  $V_{(Ar+O)} = 24 \text{ см}^3/\text{з}$  оптимальне сполучення оптичних і електричних властивостей спостерігалось при температурі підкладки ( $T_p$ ) -  $400^\circ \text{C}$  (рис.3). На залежностях

$T_{400-800}$ ,  $n$ ,  $\mu$  від  $T_p$  (рис. 3) можна виділити дві характерні ділянки, на яких фізичні механізми впливу температури осадження відповідають першим двом, котрі описані вище, що майже в два рази. Якщо співставити розміри спостерігалися при рості  $V_{(Ar+O)}$ . Необхідно оксиду цинку, то стає ймовірним, що іони In відзначити, що при  $T_p < 250^\circ \text{C}$ , незважаючи на деформують кристалічну ґратку оксиду цинку, оптимальну кількість кисню, процес мінімізації

точкових дефектів не відбувається. Це

підтверджується тим, що для нелегованих шарів оксиду цинку отриманих при цих

ZnO:Al вище. Іони індію у вузлах підґратки цинку викликають деформацію кристалічної ґратки, а іони алюмінію ні, тому за інших рівних умов Al по механізму заміщення має більшу розчинність у ZnO в порівнянні з In. В наслідок цього n у плівках ZnO:Al вище. Упорядкування в матеріалі ZnO:Al настає тільки у вузькому температурному інтервалі, коли з одного боку у підґратки цинку ще не може розчинитися значна кількість атомів алюмінію, а з іншого - температури досить високі для упорядкування твердого розчину. Атоми алюмінію у міжвузлях викликають незначні механічні деформації ґратки, тому при формуванні  $Zn_3Al_2O_6$  зменшується концентрація алюмінію не тільки в міжвузлях, але й у вузлах кристалічної ґратки, що викликає експериментально зафіксоване зниження n.

Для аналізу стабільності були проведені порівняльні дослідження впливу відпалу у вакуумі при температурі  $550^\circ\text{C}$  на структуру і властивості плівок ZnO:In, ZnO:Al і ZnO. При цьому істотного зниження оптоелектричних властивостей плівок не спостерігалось.

**У четвертому розділі** “Вплив технологічних параметрів процесу синтезу на властивості легованих плівок оксиду цинку, отриманих нереактивним розпиленням при постійному струмі” приведені результати дослідження фізичних механізмів впливу концентрації легуючої фази у складі мішені ( $CAI_2O_3$ ) і температури осадження на  $T_{400-800}$ , n,  $\mu$ , та у кінцевому підсумку на  $\Phi$  плівок ZnO:Al.

Відповідно до результатів елементного аналізу при зміні концентрації легуючої фази в складі мішені спостерігається зміна концентрації алюмінію в плівках від  $C_{Al}=3.4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при  $CAI_2O_3=1$  ваг.% у мішені до  $C_{Al}=1.7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при  $CAI_2O_3=6$  ваг.% в мішені. Згідно з експериментальними даними (рис. 4) n істотно нижче  $C_{Al}$ . Отже, у плівках ZnO:Al значна частина домішки знаходиться в електрично не активному стані. При цьому відношення  $n/C_{Al}$

розташування алюмінію є більш термодинаміч кристалічну ґратку. Дійсно, дослідження парам що з ростом до  $CAI_2O_3$  до 2.5 ваг. %. па змінюються:  $\psi=(5.5-5.8)^\circ$ ,  $L=(640-620)$  А,  $\epsilon=(0$  зерен заповнені, домішка починає більш ефек це термодинамічно більш вигідно, чим розташ ефективність легування зростає. З ростом  $CA$  легування зменшується від  $n/C_{Al}=0.47$  до  $n/C$  бути зумовлене зниженням кількості ваканс оскільки атомарна концентрація кисню в фазі

залежить від  $CAI_2O_3$ . На залежностях  $T_{400-800}(CAI_2O_3)$ ,  $n(CAI_2O_3)$ ,  $\mu(CAI_2O_3)$  плівок ZnO:Al, які отримані при температурі осадження  $400^\circ\text{C}$  (рис. 4), можна виділити три характерні інтервали.

При зростанні  $CAI_2O_3$  від 1 ваг.% до 2.5 ваг. % ефективність легування зростає від  $n/C_{Al}=0.41$  до  $n/C_{Al}=0.47$ . Це призводить до того, що збільшення n здійснюється без зменшення  $\mu$  і  $T_{400-800}$ . Максимальне значення  $\Phi=1.9 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$  спостерігається при  $CAI_2O_3=2.5$  ваг. %. Експериментально зафіксоване зростання ефективності легування на цьому характерному інтервалі дозволяє ідентифікувати кінетику входження легуючої домішки в зростаючий шар оксиду цинку. При

У літературі існує цілком обґрунтована думка, що вакансії кисню полегшують заміщення цинку алюмінієм. Тому, щоб одержати велику концентрацію основних носіїв заряду, варто використовувати мішень, у котрій легуюча домішка знаходиться в елементному виді, а не у складі окислу. Це підтверджується наведеними нами вище результатами дослідження п у плівках ZnO:Al, отриманих реактивним розпиленням.

У шарах ZnO:Al, отриманих нереактивним розпиленням, на другому характерному інтервалі спостерігається істотне зростання  $\epsilon$  від  $0.23 \cdot 10^{-3}$  ( $CA_{Al_2O_3}=2.5$  ваг. %) до  $0.67 \cdot 10^{-3}$  ( $CA_{Al_2O_3}=4.5$  ваг. %), при цьому  $L$  не змінюється. Ці результати свідчать: при таких  $CA_{Al_2O_3}$  у електрично не активному стані алюміній переважно накоплюється в міжвузлях, що викликає збільшення  $\epsilon$  та зниження  $\mu$ .

Зростання  $CA_{Al_2O_3}$  понад 5 ваг.%, що викликає відповідне зростання  $C_{Al}$ , взагалі не призводить до підвищення  $n$ . Відповідно до результатів рентгендифрактометричних досліджень це зумовлено формуванням фази  $Al_2O_3$ , яке супроводжується різким зменшенням  $L$  від  $560 \text{ \AA}$  ( $CA_{Al_2O_3}=4.5$  ваг. %) до  $200 \text{ \AA}$  ( $CA_{Al_2O_3}=5.0$  ваг. %), зниженням  $\epsilon$  від  $0.23 \cdot 10^{-3}$  до  $0.67 \cdot 10^{-3}$  і зростанням  $\psi$  від  $6.8^0$  до  $9.9^0$ . Ця фаза  $Al_2O_3$  не когерентно з'єднується з ґраткою оксиду цинку, тому її поява викликає зниження  $L$ , оскільки найбільш вірогідно, що вона розташовується на межах зерен. Зниження  $L$  інтенсифікує зниження  $\mu$ . Зростання  $\psi$  і зниження  $L$  зумовлює інтенсифікацію процесу розсіяння та поглинання світла на межах зерен і у результаті - призводить до зниження  $T_{400-800}$ .

При оптимальній концентрації у складі мішені легуючої фази ( $CA_{Al_2O_3}=2.5$  ваг.%) зі збільшенням  $T_p$  до  $550^\circ C$  спостерігається збільшення  $\Phi$  до  $3.9 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ , що зумовлено зростанням концентрації домішки в електрично активному стані на фоні менш істотного зниження  $T_{400-800}$  та  $\mu$ . Відсутність помітного впливу на електричні властивості ZnO:Al власних точкових дефектів підтверджується результатами дослідження плівок ZnO. Було ідентифіковано, що при збільшенні  $T_p$  зростання  $n$  в плівках ZnO на два порядки нижче, ніж ZnO:Al.

**У п'ятому розділі** "Вплив технологічних параметрів на структуру і властивості легованих плівок оксиду цинку, отриманих нереактивним високочастотним розпиленням" були проведені дослідження фізичних механізмів впливу потужності магнетрона і парціального тиску аргону на  $T_{400-800}$ ,  $n$ ,  $\mu$ , та у кінцевому підсумку, на критерій якості плівок ZnO:Al.

У відмінності від магнетронного розпилення на постійному струмі при високочастотному розпиленні можливо одержати плівки ZnO:Al з високим  $\Phi$  без нагрівання підкладки, шляхом варіювання  $P_w$  і  $P$ , що є істотною перевагою при нанесенні цього шару на завершальному етапі одержання багат шарової приладової структури, оскільки при цьому мінімізуються негативний вплив дифузійних процесів між сформованими раніше шарами.

Плівки ZnO:Al осаджувались шляхом високочастотного нереактивного магнетронного розпилення мішені, що містить 98 ат.% ZnO і 2 ат.% Al. Щоб аналізувати плівки однакової товщини для кожного значення потужності магнетрону та робочого тиску було встановлено швидкість осадження плівок. Для плівок товщиною 0.3 мкм при  $P=1 \cdot 10^{-4}$  Па,  $T_p=20^\circ\text{C}$  і  $P_w=150$  Вт був досягнутий максимальний  $\Phi - 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ . На графіку залежності оптичних та електричних властивостей плівок ZnO:Al від  $P_w$  можна виділити два характерних інтервали. При  $P_w < 150$  Вт збільшенню  $P_w$  відповідає зростання  $\mu$  і  $n$  на тлі незмінного  $T_{400-800}$ , що зумовлено ростом розмірів о.к.р. Дійсно збільшення  $P_w$  від 50 Вт до 150 Вт призводить до зростання  $L$  від 240 Å до 460 Å. При збільшенні  $P_w$  зростає енергія часток кисню, цинку й алюмінію, які надходять до підкладки, внаслідок цього збільшується їх рухливість на поверхні підкладки, що і викликає збільшення  $L$ . Зростання  $L$  призводить до зниження розсіювання носіїв заряду на межах зерен і зменшення кількості легуючої домішки в електрично не активному стані на межах зерен поверхні. Це й зумовлює спостережене покращення електричних параметрів плівок ZnO:Al. При  $P_w > 150$  Вт спостерігається зниження  $\mu$  і  $T_{400-800}$  на фоні незначного росту  $n$ . При таких більш високих потужностях магнетрона, незважаючи на зростання  $L$ , яке продовжується, оптоелектричні властивості плівок починають контролюватися дефектною структурою об'єму зерна, а не межами зерен. Це зумовлено суттєвим збільшенням швидкості осадження від 10 нм/хв при  $P_w=150$  Вт до 60 нм/хв при  $P_w=400$  Вт. При зростанні швидкості осадження імовірність протікання реакції синтезу оксиду цинку зменшується, що призводить до росту концентрації власних точкових дефектів. Дійсно: так само, як і для ZnO:Al, так і для ZnO із ростом  $P_w$  понад 150 Вт спостерігається зростання  $n$ , зниження  $\mu$  і  $T_{400-800}$ .

При  $P_w=150$  Вт,  $T_p=20^\circ\text{C}$  збільшення  $P$  від  $1 \cdot 10^{-4}$  Па до  $2 \cdot 10^{-3}$  Па призводить до істотного зниження  $\mu$  від  $31 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  до  $9 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  і менше значного зменшення  $n$  від  $4.8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $3.9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Це підтверджено дослідженнями, які виявили істотне зменшення  $L$  від 460 Å до 270 Å, зростання  $\epsilon$  від  $0.40 \cdot 10^{-3}$  до  $0.86 \cdot 10^{-3}$  і  $\psi$  від  $6.0^\circ$  до  $8.2^\circ$ . При збільшенні  $P$  енергія часток кисню, цинку й алюмінію, що надходять до підкладки, зменшується, що зумовлено зменшенням довжини вільного пробігу з ростом робочого тиску. Зменшення їхньої кінетичної енергії призводить до зниження їхньої поверхневої рухливості і зменшує ймовірність протікання хімічної реакції синтезу оксиду цинку. Це зумовлено кристалічною структурою плівок оксиду цинку.

Проведені дослідження показали, що плівки ZnO:Al, отримані методом реактивного магнетронного розпиленням, в порівнянні з шарами, отриманими нереактивним розпиленням, мають менші розміри  $L$ . Одним із найбільш простих традиційних способів підвищення розмірів  $L$  є збільшення товщини плівок. Дослідження показали, що оптимальне сполучення оптичних і

електричних властивостей у плівках ZnO:Al товщиною 1 мкм спостерігалось при робочому тиску  $1 \cdot 10^{-4}$  Па (рис. 5).

Рис. 5. - Залежності оптоелектричних параметрів плівок ZnO:Al, отриманих при температурі підкладки  $20^{\circ}\text{C}$ , від робочого тиску .

Це пов'язано зі зниженням поверхневої рухливості атомів на поверхні осаджуваної плівки. Очевидно, що такий ефект виявляється більш інтенсивно при збільшенні товщини шару. У проміжках між зернами, що звужуються, формується зерна другої текстури.

## ВИСНОВКИ

1. Визначенні фізичні механізми і закономірності впливу технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилу на критерії якості легованих шарів оксиду цинку, що дозволило розробити фізичні основи оптимізації фізико-технологічних умов різних видів магнетронного розпилення для одержання легованих шарів оксиду цинку з високими коефіцієнтами якості.
2. При реактивному магнетронному розпиленні на постійному струмі отримання оптимальних оптоелектричних властивостей плівок ZnO:In, здійснюється при температурі більше 350 °С і швидкості напуску аргонно-кисневої суміші  $V_{(Ar+O)}=24 \text{ см}^3/\text{с}$  в процесі осадження, ці параметри і забезпечують формування в матриці фази оксиду цинку когерентно сполучених із нею фрагментів фази  $\text{Zn}_3\text{In}_2\text{O}_6$ .
3. Внаслідок більш низького іонного радіуса алюмінію в порівнянні з індієм формування фази  $\text{Zn}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  призводить до зниження концентрації основних носіїв заряду в плівках ZnO:Al. Тому при реактивному магнетронному розпиленні на постійному струмі необхідно усунути можливість утворення фази упорядкування, для цього температура підкладки повинна бути вищою за 300 °С, що забезпечує максимальну розчинність алюмінію в підгратці цинку при мінімізації концентрації власних точкових дефектів.
4. Оптимальна концентрація легуючої фази  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , яка складає 2.5 ат.% у складі мішені ZnO: $\text{Al}_2\text{O}_3$ , при нереактивному магнетронному розпиленні на постійному струмі визначається двома конкуруючими фізичними механізмами: одночасним зростанням концентрації атомів алюмінію в електрично активному і електрично неактивному стані. Останній спочатку викликає зниження рухливості основних носіїв заряду за рахунок зросту мікрореформації, а потім - за рахунок формування фази  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що викликає зниження розмірів областей когерентного розсіювання. При цьому експериментально показано, що співвідношення між атомами алюмінію в електрично активному і не активному стані визначається не тільки складом мішені, а і температурою осадження, оптимальне значення якої становить 500 °С.
5. Зростання потужності магнетрону при одержанні шарів ZnO:Al високочастотним магнетронним розпиленням, з одного боку, призводить до збільшення розмірів області когерентного розсіювання і зниження ступеня розсіювання текстури, а з іншого, - збільшує концентрацію власних точкових дефектів. Співвідношення ступеню впливу цих двох фізичних механізмів на коефіцієнт якості і визначає оптимальну потужність магнетрону яка для використовуваної досліджуваної установки складала 200 Вт, оскільки перший зумовлює зростання рухливості основних носіїв заряду, а другий - зменшення не тільки рухливості, а і коефіцієнту пропускання.
6. Збільшення товщини шару ZnO:Al при високочастотному нереактивному магнетронному розпиленні призводить до росту коефіцієнту якості за рахунок збільшення рухливості і

концентрації основних носіїв заряду тільки при низьких значеннях робочого тиску аргону до  $10^{-4}$  Па. З збільшенням робочого тиску до  $2 \cdot 10^{-3}$  Па зростання товщини шару ZnO:Al від 0.3 мкм до 1 мкм призводить до зниження цих електричних параметрів, що зумовлено появою в шарах другої текстури в напрямку [101].

7. Шляхом ідентифікації фізичних механізмів впливу технологічних параметрів різних видів магнетронного розпилення на структуру, оптичні й електричні властивості плівок ZnO:Al і ZnO:In проведена оптимізація фізико-технологічних умов їх одержання. У результаті методами реактивного і неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі отримані шари оксиду цинку з коефіцієнтом якості, що відповідає світовим аналогам -  $\Phi_{\text{ZnO:In}}=1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ ,  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=9.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$  і  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=3.4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$  відповідно, а неактивним високочастотним магнетронним розпиленням - із його рекордним значенням  $\Phi_{\text{ZnO:Al}}=1.4 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}^{-1}$ .

8. Оптимізовані режими магнетронного розпилення були реалізовані при отриманні плівок ZnO:Al при створенні конструкції фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії системи Mo/CuInSe<sub>2</sub>/CdS/ZnO/ZnO:Al, з коефіцієнтом корисної дії 16 %, та плівкових фотодіодів та фототранзисторів.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бойко Б.Т., Хрипунов Г.С., Копач В.Р., Ковтун Н.А. Электрические и оптические свойства поликристаллических пленок ZnO:Al, полученных методом магнетронного распыления. // Вопросы атомной науки и техники. Харьков:-1999. -№ 2 (10). - С. 75-78.

2. Бойко Б.Т., Хрипунов Г.С., Ковтун Н.А. Электрические и оптические свойства поликристаллических слоев ИТО, полученных методом магнетронного распыления при комнатной температуре подложки. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Тематический выпуск: “Физические аспекты современных технологий”.- Харьков: НТУ “ХПИ” – 2000. – Вып. 103. – С. 16-19.

3. Ковтун Н.А. Влияние температуры подложки на электрические и оптические свойства поликристаллических пленок ZnO:Al, полученных методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. // Сборник научных трудов. Тематический выпуск: “Автоматика и приборостроение”.- Харьков: НТУ “ХПИ” – 2001. – Вып. 4. – С. 112-113.

4. Бойко Б.Т., Хрипунов Г.С., Ковтун Н.А., Черніков А.И. Дослідження електричних та оптичних властивостей полікристалічних шарів ZnO:In, отриманих методом реактивного магнетронного розпилення.// Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – Т. 2, № 2 – С. 189-194.



5. Boyko B. T., Kovtun N. A., Panchekha P.A., Khrypunov G.S. The investigations of the structure, electrical and optical properties ZnO doping films, obtained by reactive magnetron sputtering method. // Functional Materials. -2001. - Vol. 8. - N4. – p.653 – 658.

6. Ковтун Н.А. Дослідження властивостей полікристалічних плівок ZnO, легованих Al, отриманих методом неактивного магнетронного розпилення.// Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 3 – С. 401-405.

7. Klochko N.P., Kopach V.R., Rjabchun A.A., Khrypunov G.S., Kovtun N.A. Relation between deposition conditions and composition of electrodeposited Cu-In-Se thin films // Functional Materials.-1998.- Vol.5.- N1.-p.48-51

8. Klochko N.P., Volkova N.D., Kopach V.R., Kovtun N.A. Investigation of electrodeposition kinetics of ZnSe films. Functional Materials. -2001.- Vol.8.- N4. -p. 668 – 672.

### АНОТАЦІЯ

**Ковтун Н. А. Структура, оптичні і електричні властивості легованих плівок оксиду цинку, виготовлених методами магнетронного розпилення. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 - Фізика твердого тіла. Науково-технічний центр електрофізичної обробки НАН України, м. Харків, 2005 р.

Показано, що отримання оптимальних оптоелектричних властивостей для плівок ZnO:In та ZnO:Al, отриманих реактивним магнетронним розпиленням на постійному струмі, відбувається завдяки різним фізичним механізмам, що пов'язано з різними атомарними радіусами алюмінію та індію. Встановлено, що при високочастотному неактивному магнетронному розпиленні при збільшенні робочого тиску спостерігається нетрадиційна зміна фізичних закономірностей впливу товщини плівок ZnO:Al на значення концентрації основних носіїв заряду. Уточнені та обґрунтовані фізичні механізми впливу на оптоелектричні властивості плівок ZnO:Al концентрації легуючої фази у складі мішені при неактивному магнетронному розпиленні і потужності магнетрона при високочастотному розпиленні.

**Ключові слова:** плівки оксиду цинку, метод магнетронного розпилення, поверхневий електроопір, коефіцієнт пропускання, коефіцієнт якості, структура, фізичні механізми впливу технологічних параметрів на оптоелектричні властивості плівок.

### ABSTRACT

**Kovtun N.A. Texture, optical and electrical properties of zinc oxide doped films, obtained by means of magnetron sputtering technique. -Manuscript.**

Thesis for a Ph. D. degree by specialty 01.04.07. – State solid physics. – The scientific and technological center of electrophysics NASU, Kharkiv, 2005.

It is shown, that obtaining of optimal optoelectrical properties for ZnO:In and ZnO:Al films by means of reactive magnetron sputtering on direct current takes place owing to the different physical mechanisms, that connected with different atomic radius of aluminum and indium.

It has been established, that nonconventional change of physical dependencies of influence of ZnO:Al film thickness on majority charge carrier concentration is observed at non-reactive rf magnetron sputtering when increasing service pressure.

Physical mechanisms of influence on optoelectrical properties of ZnO:Al films of doped phase concentration consisting of the target at non-reactive magnetron sputtering and magnetron power in case of rf-sputtering are improved and justified.

**Keywords:** zinc oxide films, magnetron sputtering, surface electrical resistivity, transmission factor, quality factor, texture, physical mechanisms of technological parameter influence on optoelectrical properties of films.

## АНОТАЦИЯ

**Ковтун Н. А. Структура, оптические и электрические свойства легированных пленок оксида цинка, полученных методами магнетронного распыления.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук за специальностью 01.04.07 - Физика твердого тела. Научно-технический центр электрофизической обработки НАН Украины, Харьков, 2005.

Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, м. Харьков, 2005 р.

Диссертационная работа посвящена задаче исследования физических механизмов влияния физико-технологических параметров различных видов магнетронного распыления на структуру, оптические и электрические свойства легированных пленок оксида цинка. Решение этого задания позволит разработать промышленную технологию изготовления прозрачных поликристаллических слоев оксида цинка приборного качества для использования их в изделиях оптоэлектроники.

Путем сопоставительного анализа кристаллической структуры, оптических и электрических свойств легированных и нелегированных пленок оксида цинка установлены физические механизмы влияния собственных точечных дефектов, фазового состава, размеров области когерентного рассеивания, уровня микродеформации, степени рассеивания текстуры и концентрации легирующей примеси в составе мишени на фактор качества пленок ZnO:Al и ZnO:In, полученных различными видами магнетронного распыления.

Показано, что получение оптимальных оптоэлектрических свойств пленок ZnO:In, полученных реактивным магнетронным распылением на постоянном токе, достигается за счет формирования релаксированного структурного состояния, при котором в матрицу фазы оксида цинка когерентно включены фрагменты фазы  $Zn_3In_2O_6$ . Формирование этой фазы приводит к снижению микродеформации и степени рассеивания текстуры, росту размеров областей когерентного рассеивания.

Установлено, что формирование фазы  $Zn_3Al_2O_6$  не обеспечивает получение оптимальных оптоэлектрических свойств пленок ZnO:Al, поскольку из-за низкого ионного радиуса алюминия формирование этой фазы сопровождается уменьшением концентрации атомов алюминия в электрически активном состоянии.

Пленки ZnO:Al обладают более высокой стабильностью оптоэлектрических характеристик по сравнению с пленками ZnO:In. Это обусловлено тем, что в процессе отжига они не только не представляют диффузионные источники алюминия, но и демонстрируют увеличение фактора качества. Это связано с увеличением в отожженных слоях ZnO:Al концентрации алюминия в узлах подрешетки цинка.

Установлено, что зависимость электрических и оптических свойств пленок ZnO:Al от состава распыляемой мишени определяется сменой доминирующих физических механизмов влияния концентрации легирующей примеси в растущем слое на его фазовый состав и кристаллическую структуру.

Идентифицировано нетрадиционную смену физических закономерностей влияния толщины пленок ZnO:Al на величину концентрации основных носителей заряда при высокочастотном неактивном магнетронном распылении при увеличении рабочего давления.

Уточнены и обоснованы физические механизмы влияния концентрации легирующей фазы в составе мишени при неактивном магнетронном распылении на постоянном токе и мощности магнетрона при неактивном высокочастотном распылении на кристаллическую структуру и оптоэлектрические свойства пленок ZnO:Al.

Определены технологические параметры неактивного магнетронного распыления при постоянном токе и высокочастотном магнетронном распылении, при реализации, которых формируются прозрачные и проводящие пленки ZnO:Al с факторами качества, соответствующим мировым аналогам для этих типов магнетронного распыления.

**Ключевые слова:** пленки оксида цинка, метод магнетронного распыления, поверхностное электросопротивление, коэффициент пропускания, коэффициент качества, структура, физические механизмы влияния технологических параметров на оптоэлектрические свойства пленок.