

Академія наук України  
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича

На правах рукопису

ТОНКОШОР Олександр Сергійович

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЯВИЩА В НЕОДНОРІДНИХ СТРУКТУРАХ  
МАТРИЧНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1992

076 26.796  
Робота виконана у Дніпропетровському державному університеті

Офіційні опоненти:

Доктор фізико-математичних наук, професор М.Д. ГЛІНЧУК  
Доктор фізико-математичних наук, професор В.О. ЗУБ  
Доктор фізико-математичних наук, професор В.А. БРОДОВИЙ

Ведуча організація:

Науково-дослідний Інститут "Гирikonд" (м. Санкт-Петербург).

Захист відбудеться " 23 " *лютого* 1993 р. у 10 год.  
на засіданні спеціалізованої ради Д 016.23.01 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича АН України.

Адреса: 252680, Київ-680, вул. Крижановського, 3,  
Інститут проблем матеріалознавства АН України

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту.

Автореферат розіслано " 20 " *січня* 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук

Д.В. ПАДЕРНО

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00814478 (W)



Актуальність теми. Одним із нових розділів сучасної фізики твердого тіла є дослідження неоднорідних структур, що обумовлено їх практичною важливістю і фундаментальним характером висунутих теоретичних завдань. Із класу неоднорідних структур особливо слід виділити системи матричного типу, де явища відбуваються з участю декількох, різних по властивостям фаз (металів, діелектриків, кристалічних і неупорядкованих напівпровідників). Значення їх обумовлено широким спектром тільки їм притаманних властивостей, визначених комплексом електронних процесів на межах фаз.

Об'єктом досліджень даної роботи є дисперсії та шаруваті системи, напівпровідникова фаза яких розміщена в діелектричній матриці. Виявлені в таких об'єктах варисторний і фотоваристорний ефекти, чутливість електричних властивостей до процесів адсорбції і поверхневих хімічних реакцій ставлять до ряду першорядних проблему досліджень електронних процесів, які виникають в них в електричному полі. Подальший прогрес в вивченні та ефективному використанні таких систем неможливий без суттєвих кроків в розвитку уявлень про поляризаційні явища і їх ролі в формуванні електричних властивостей, які б дозволили створити рівень їх застосування, відповідний досягнутому для однорідних напівпровідникових речовин. В зв'язку з цим тема дисертації виявляється актуальною і своєчасною. Вирішення поставлених завдань є суттєвим внеском в розвиток фізики неоднорідних систем.

При здійсненні досліджень виявлений ряд нових явищ з участю локалізованих електронних станів в процесі поляризації і формуванні електричної провідності розглянутих об'єктів: низькочастотна діелектрична дисперсія, специфічні токи ізотермічної і термостимульованої деполіризації, трансформації форми нелінійних вольт-амперних характеристик, аномальні газочутливі властивості систем на основі неупорядкованих напівпровідників. Перспективність цих ефектів до практичного використання стала стимулом до їх всебічного вивчення.

Ціль роботи. Цілью роботи являється розробка основ теоретичного опису і аналізу поляризаційних явищ і їх дії на формування електричних властивостей матричних неоднорідних структур на основі напівпровідників та створення на цій базі методів контролю фізичних параметрів неоднорідних матеріалів і прогнозування електричних характеристик елементів електронної техніки, які використо-

зуть ці явища.

### Наукові завдання роботи:

1. Розробити методи, які дозволяють математичне моделювання поляризації вільного заряду, діелектричних явищ та нелінійних польових ефектів в неоднорідних системах матричного типу на основі напівпровідників з зонами електропровідності:

а) обґрунтувати наближення, розробити методи вирішення сформульованої в найбільш загальному вигляді системи рівнянь і крайових умов, описувачих поляризацію в ізолюваному об'ємі напівпровідника, розробити методи опису діелектричних і термополяризаційних явищ, емісійного ефекту поля в неоднорідних об'єктах, які відповідають одноісній-шаруватій та ізотропній трьохісній (яка являє собою статистичний розподіл частинок напівпровідника сферичної форми в діелектричній матриці) моделям;

б) вивчити фізичні закономірності виявлення особливостей процесів електропереносу і захоплення носіїв заряду на локалізовані електронні стани в об'ємі напівпровідникової фази в імпедансних характеристиках зазначених неоднорідних систем;

в) провести аналіз дії поверхневих явищ, зокрема ефектів, зв'язаних з наявністю поверхневих електронних станів, просторового і "збудованого" в діелектричну матрицю заряду;

г) розробити підхід і методи розрахунку статичної електропровідності та її польової залежності неоднорідних об'єктів в рамках ізотропної трьохісної моделі з врахуванням впливу на розподіл електричного поля поляризаційних явищ і неупорядкованості розташування напівпровідникових частинок в діелектричній матриці.

2. Провести експериментальні дослідження електричних властивостей, спрямовані на знаходження і вивчення ефектів, зв'язаних з поляризаційними явищами, визначення фізичних параметрів та їх порівняння з вже відомими в літературі оцінками для найбільш відомих в електронній техніці неоднорідних матричних структур: композиційних фотопровідникових шарів на основі сульфїду кадмію і варисторної оксидно-цинкової кераміки.

3. Дослідити особливості поляризаційних явищ в неоднорідних структурах матричного типу на основі напівпровідників з стрибковим електронним переносом по локалізованих станах:

а) розробити математичні моделі поляризаційних явищ, які враховують зазначену специфічність механізму об'ємної електропровідності;

б) провести експериментальні дослідження електричних властивостей, інтерпретація виявлених ефектів, визначення фізичних параметрів та порівняння їх з літературними даними для шаруватих систем на основі оксидних скловидних напівпровідників.

4. Розробити фізичні основи застосування поляризаційних явищ в неоднорідних структурах на основі напівпровідників:

а) розробити методи прогнозування технічно цікавих ефектів і характеристик пристроїв на основі вивчаємих структур;

б) розробити методи неруйнівного контролю параметрів електронних процесів в приладах;

в) розробити методи дослідження та контролю фізичних параметрів, важливих для наукового супроводу технологічних процесів виробництва порошкоподібних напівпровідникових матеріалів.

Наукова новизна. Вперше обгрунтовані наближення і розроблені методи вирішення сформульованої в найбільш загальному вигляді системи рівнянь та крайових умов, описувачих поляризаційні явища в ізолюваних напівпровідникових включеннях, відповідні реальним ситуаціям біполярного та квазімонополярного електропереносу по дозволених зонах енергій, стрибкової провідності по локалізованих електронних станах. Розвинуті методи розрахунку електричних характеристик дисперсних систем в рамках прийнятої моделі напівпровідникових включень в діелектричній матриці, враховувачі дипольні польові взаємодії і уявлення теорії протікання.

Установлені закономірності участі локалізованих станів в поляризаційних явищах та їх вплив на електричні властивості неоднорідних матричних структур. Експериментально виявлені та інтерпретовані ефекти перезарядки зазначених станів в спектрах комплексної діелектричної проникності, польової залежності електропровідності, особливостях температурних залежностей струмів ізотермічної і термостимульованої деполіризації для композиційних фотопровідникових структур на основі дрібнокристалічного сульфід кадмію та керамічних оксидно-цинкових варисторів.

Вперше викладено, обгрунтовано та апробовано застосування поляризаційних явищ в системі метал – напівпровідник для досліджень електронних процесів в неупорядкованих напівпровідникових матеріалах із стрибковим електропереносом по локалізованим станам на прикладі оксидного ванадієво-фосфатного скла. Одержані дані про їх енергетичний спектр. Запропонований механізм електропровідності з участю локалізованих станів перехідного шару в системі платина – ванадієво-фосфатне скло, дозволив інтерпретувати виявлені її ано-

м'яльні газочутливі властивості.

Виявлені і вивчені перколяційні ефекти в електропровідності оксидно-цинкової кераміки. Розвинута модель електропереносу в неоднорідних структурах з тунельним механізмом електропровідності в міжкристалітних потенціальних бар'єрах з позиції принципів теорії протікання і врахування розподілу поля в згаданих бар'єрах.

Основні положення, які виносяться на захист:

1. Можливість застосування наближення рівня захоплення для локалізованих електронних станів при опису діелектричних явищ в неоднорідних структурах на основі напівпровідників.

2. Зв'язок процесів їх перезарядки з виявленням низькочастотної (попередньою миксваловою) діелектричної дисперсії, а також відповідальність перезарядки поверхневих електронних станів за зміщення вольт-амперних характеристик в бік більших напруг та за появу піків струму термостимульованої деполаризації в його температурних залежностях.

3. Пропорційнальність квадратних коренів для зворотної величини діелектричної проникності, визначеної ємністю області просторового заряду, та напруги електричного поля в висококонцентрованих дисперсних системах з напівпровідниковими вклученнями.

4. Перколяційний характер електропровідності дисперсних систем, яка здійснюється тунелюванням через потенціальні бар'єри поміж напівпровідниковими частинками, обумовлений розкидом товщин матричної фази поміж ними.

5. Участь пересадочних локалізованих електронних станів перехідного шару (проміжку) в здійсненні електропровідності контактів метал - напівпровідник із стрибковим механізмом електропереносу; зв'язок аномального зменшення електропровідності контакту платина - оксидне ванадієво-фосфатне скло в атмосфері водню зі зменшенням числа зазначених пересадочних станів, створених попередньо адсорбованим киснем, внаслідок поверхневої хімічної реакції.

Перспективний науковий напрямок, розвинутий в дисертації - фізичні основи застосування поляризаційних явищ в неоднорідних структурах на основі напівпровідників.

Практичне значення результатів роботи. Одержані результати дозволили виявити та математично описати ряд фізичних ефектів, перспективних для створення елементів електронної техніки і способів контролю за властивостями неоднорідних матеріалів. Зокрема, на

ція основі розвинуті методи прогнозування електричних характеристик та режимів роботи ряду електронних приладів: вольт-амперної характеристики та її коефіцієнта нелінійності металоксидних варисторів, коефіцієнта перекривання по ємностях, добротності, параметрів, визначальних швидкості ДПІ, функцій перетворення фотоємнісних перетворювачів-шаруватих та розроблених на основі дрібнокристалічного сульфїду кадмїв композиційних структур, позиційно чутливих фотоприймачів на їх базі. Зазначені можливості перспективного застосування контакту платина - оксидне ванадієво-фосфатне скло в якості активних елементів низькотемпературних газочутливих датчиків.

Розвинутий для визначення таких фізичних параметрів як об'ємна електрична провідність, параметри локалізованих електронних станів композиційних фотопровідникових структур, оксидно-цинкової кераміки і шаруватих систем метал - оксидний скловидний напівпровідник, підхід на базі методів електричної спектроскопії, вольт-фарадних характеристик, ізотермічної і термостимульованої деполіризації може бути основою для вирішення одної із актуальних в теперішній час задач - дослідження і контролю електронних процесів в неоднорідних та неупорядкованих матеріалах.

Приведені конкретні засоби контролю та розрачування по електричних характеристиках порошкоподібних напівпровідникових систем на прикладах оксиду цинка, дрібнокристалічного сульфїду кадмїв, оксидних нікель-цирконієвих та мідь-цинк-алюмінієвих каталізаторів обґрунтують перспективність такого підходу до вирішення загальної проблеми контролю та керування технологічними процесами виготовлення матеріалів із потрібними властивостями.

Апробація роботи. Результати досліджень були висвітлені на таких конференціях: Республіканська науково-технічна конференція "Фізичні основи побудови первинних вимірвальних перетворювачів" (Вінниця, 1977); науково-технічної конференції "Застосування нелінійних обмежувачів перенапруження в високовольтних установках" (Ленінград, 1977); Всесоюзної наукової конференції "Фізика діелектриків і нові області їх застосування" (Караганда, 1978); II Всесоюзній нараді по глибоким рівням в напівпровідниках (Ташкент, 1980); IV Республіканська конференція "Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників" (Ужгород, 1980); УП Всесоюзній конференції "Механізми релаксаційних явищ в твердих тілах" (Воронєж, 1980); II Республіканська конференції по фотоелектричним явищам в напівпровідниках (Одеса, 1982); Науково-технічній конференції

решенні "Нові електронні прилади та пристрої" (Москва, 1962); Всесоюзній науковій конференції "Фізика діелектриків" (Баку, 1964); Республіканському семінарі "Автоматичні методи хімічного контролю в промисловості" (Донецьк, 1964); Всесоюзному науково-технічному семінарі "Науково-технічний прогрес в розробці і застосуванні нових керамічних матеріалів та виробів для електроніки в механізації і автоматизації технологічних процесів та обладнання" (Москва, 1966); Всесоюзній конференції "Фізика і застосування контакту метал - напіпровідник" (Київ, 1967); У - Міжгалузевія конференції по оксидно-цинковим варисторам (Дніпропетровськ, 1967); УІ Всесоюзній конференції по фізиці діелектриків (Томськ, 1968); Всесоюзній науково-технічній конференції "Оптичний, радіохвильовий та тепловий методи неруйнівного контролю" (Могилів, 1969); ІУ Всесоюзній нараді "Фізика, хімія та технологія ламінофорів" (Ставрополь, 1969) та інших конференціях.

Публікації та внесок автора. Основні результати опубліковані в роботах, перелік яких приведений в кінці автореферату. В дисертації узагальнені результати досліджень проведених з 1972 по 1992 рік. Автором сформульовані і обґрунтовані всі задачі досліджень по темі дисертації. Всі дослідження виконані при безпосередній участі автора. Частина експериментальних результатів одержана сумісно із спірабітниками. В колективних роботах автору належать викладені в даному авторефераті положення, винесені на захист, та висновки.

Об'єм та структура дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків та списку літератури. Вона нараховує 268 сторінок машинописного тексту, 103 рисунки, 13 таблиць та список літератури із 443 назв. Повний об'єм роботи складає 345 сторінок.

### ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

В вступі обговорюється актуальність проблеми, яка вирішується в роботі, встановлюється її місце в області природних та технічних наук, визначається ціль роботи, сформульовані основні значимі результати, одержані в дисертації, і положення, які виносяться на захист.

Перший розділ містить аналітичний огляд літератури.

Проблемі поляризаційних явищ в неоднорідних твердих тілах приділяється значна увага, починаючи з відомих робіт Максвелла (1881) та Вагнера (1914) до теоретичному опису міжповерхневої поляризації.

Початковим етапом в вивченні поляризаційних явищ в неоднорідних структурах в напіпровідникової фазі стали дослідження фото-

діелектричного ефекту в фоточутливих кристалах з блокувальними електродами і полікристалічних матеріалах (Оксман, Вергунао, Брозер, Калман, Кріспін та Інші) і теоретичний аналіз з використанням наближення незарядженості поверхні розділу напівпровідник – діелектрик (Френкель, Трухан, Макдональд), виконані в 50–60 роки. Аналізувалося, в основному, вплив кінцевої глибини проникнення електричного поля в напівпровідникову фазу структур на їх діелектричні властивості, а пізніше і струми термостимульованої деполіризації (ТСД) в рамках моделі електронейтрального об'єкту з блокувальними електродами (Губкін, Едан, Сандомірський, Ожередов, Бордовський, Гороховатський та Інші).

Наступний етап пов'язаний з розвитком сучасних уявлень фізики електронних процесів на поверхні і в контактах напівпровідника з другими фазами.

Електронні процеси, які реалізуються при прикладенні електричного поля до розглядаємих неоднорідних структур матричного типу, в значній мірі визначають їх властивості і комплекс специфічних явищ (ускладнену діелектричну дисперсію, струми ТСД, смісний ефект поля і т.п.), перспективних до розробки електронних приладів та методів контролю параметрів неоднорідних середовищ. Але існуючий рівень вивчення таких неоднорідних об'єктів не забезпечує їх ефективного використання. Так, до викладених досліджень були практично відсутні підходи та методи теоретичного опису їх електричних властивостей; не була вивчена роль локалізованих електронних станів (ЛЕС) і зарядженості поверхні напівпровідника (включаючи ряд явищ, які називаються поверхневими); не досліджений вплив структурної неупорядкованості на формування електричних характеристик для систем з дисперсною структурою. Звідси витікає актуальність моделювання поляризаційних явищ, апробації одержаних результатів в експерименті та застосування їх на практиці.

По результатам проведеного літературного огляду були сформульовані цілі та завдання досліджень.

Другий розділ присвячений розвитку теорії діелектричних явищ в матричних системах з напівпровідниковими вклученнями. Її основою вибрана найбільш узагальнена система рівнянь і краєвих умов, яка описує поляризацію вільного заряду в ізолюваному напівпровідниковому об'ємі.

$$\frac{\partial n^{\pm}}{\partial t} = \pm \frac{1}{e} \operatorname{div} j^{\pm} + g^{\pm} - \sum_{i=1}^{N_{\nu}} R_{\nu i}^{\pm}; \quad (1)$$

$$N_{qi} \frac{df_{qi}^-}{dt} = R_{qi}^- - R_{qi}^+; \quad (2)$$

$$\Delta \Psi = -\frac{e}{\epsilon_A \epsilon_n} \left[ n^+ + \sum_{i=1}^{M_1^+} N_{vi} f_{vi}^+ - n^- - \sum_{i=1}^{M_1^-} N_{vi} f_{vi}^- \right]; \quad (3)$$

$$j_H^{\mp} |_{z=0} = e \sum_{i=1}^{M_2} R_{si}^{\mp}; \quad (4)$$

$$\epsilon_A \epsilon_n' \text{grad}_H \Psi_A |_{z=0} = \epsilon_A \epsilon_n' \text{grad}_H \Psi |_{z=0} + Q_S; \quad (5)$$

$$\Psi_A |_{z=0} = \Psi |_{z=0}, \quad (6)$$

$$j^{\mp} = \pm e D^{\mp} \text{grad} n^{\mp} - e \mu^{\mp} n^{\mp} \text{grad} \Psi; \quad f_{qi}^+ = 1 - f_{qi}^-;$$

$$R_{qi}^{\mp} = C_{qi}^{\mp} N_{qi} [f_{qi}^{\pm} n^{\mp} - f_{qi}^{\mp} N_{qi}^{\mp}]; \quad Q_S = e \sum_{i=1}^{M_2^+} N_{si} f_{si}^+ - e \sum_{i=1}^{M_2^-} N_{si} f_{si}^-.$$

Індекси "-" і "+" відповідають параметрам електронів та дірок, "н" - нормальній до поверхні розділу складової векторів, "q" - приймає значення "v" та "s", які означають належність параметрів об'єму або поверхні напівпровідника;  $\Psi_A$  - потенціал в ізолюючій матриці, який визначається розв'язанням рівняння  $\Delta \Psi_A = 0$ ;  $C_{qi}^{\mp}$ ,  $N_{qi}^{\mp}$ ,  $f_{qi}^{\mp}$  - коефіцієнти захоплення, приведені ефективні густини станів, функції заповнення електронами або дірками ЛЕС і-го типу;  $M_{qi}^{\mp}$  - число типів ЛЕС, які заряджаються негативно (знак "-") і позитивно (знак "+");  $g^{\mp}$  - інтенсивності зовнішньої генерації носіїв заряду. Останні позначення загальноприйняті.

При аналізі діелектричних явищ можлива лінеаризація системи (1) - (6) шляхом зображення невідомих змінних  $n^{\mp}$ ,  $f_{qi}^{\mp}$  і  $\Psi$  як і є функціями координат  $x$  та часу  $t$  в формі:

$$a(x, t) = a_0(x) + a_1(x) \exp(j\omega t), \quad (7)$$

де Індекс "0" відповідає рівноважному (стаціонарному) значенню відповідного параметру, а Індекс "1" - нерівноважному його додатку, який викликається слабким електричним полем  $E_1 \exp(j\omega t)$ .

Процедура знаходження еквівалентної комплексної діелектричної проникності (КДП)  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ , таким чином, зводиться до виводу аналітичних виразів для емісійного струму у випадку шаруватої системи або ефективного електричного дипольного моменту окремої сферичної напівпровідникової частинки в послідовним застосуванням методу

самузгодженого поля у випадку статистично неупорядкованої системи напівпровідникових частинок в діелектричній матриці. При цьому аналітичне розв'язання лінеаризованої системи рівнянь (1) - (6) в загальному вигляді недоступно внаслідок координатної залежності багатьох її коефіцієнтів. Підхід до проблеми, визначений в роботі, дозволяє обійти цю перешкоду і складається з розділу сформульованої задачі на ряд конкретних, практично цікавих ситуацій, що дозволяє використати додаткові спрощувчі умови.

Першою проаналізована модель діелектричної дисперсії, неускладненої поверхневими явищами, що відповідає відсутності поверхневих електронних станів (ПЕС) та викривлення енергетичних зон в приповерхневій області напівпровідника. В цих наближеннях система (1) - (6) при лінеаризації перетворюється в систему диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами, розв'язання якої можливо одержати в найбільш загальному вигляді, що відповідає цілим виявленням особливостей електропереносу в напівпровідниковій фазі в діелектричних спектрах розглянутих неоднорідних об'єктів.

В структурах на основі напівпровідників з малою концентрацією ЛЕС  $N_{vl}$  основний внесок в формуванні спектра КДП вносять вільні носії заряду. Статичну діелектричну проникність визначають носії заряду, які мають велику концентрацію. При близьких концентраціях і значних відмінностях в рухливості можливий поділ єдиної області дисперсії на дві, які відповідають максвеловським релаксації різних носіїв заряду. З ростом їх концентрації має місце перехід до відомих виразів, одержаних в наближеннях теорії Максвелла-Вагнера.

Присутність ЛЕС приводить до їх участі в формуванні поляризаційного заряду. Аналіз цих ефектів в рамках моделі квазімонополярного напівпровідника ( $n$ -типу), де активними ЛЕС (рівняння захоплення) є здебільшого центри прилипання, дозволили встановити такі закономірності. В спектрі КДП в діапазоні, де  $\omega \tau_{vl} \sim 1$  (величина  $\tau_{vl}$  - відповідає часу захоплення вільних носіїв заряду на ЛЕС  $l$ -го типу) може виявитися низькочастотна, попередня максвеловська, діелектрична дисперсія, обумовлена ефектом їх перезарядки. Прояв вказаної діелектричної дисперсії визначається вимогою, щоб приток вільних носіїв заряду встигав слідувати за встановленням квазірівноважного розподілу між зонами і рівнем захоплення, тобто, необхідно щоб  $\tau_{vl} \gg \tau_M$  ( $\tau_M$  - час максвеловської релаксації). При  $\tau_{vl} \leq \tau_M$  процеси екранування електричного поля лімітуються стадією максвеловського поділу зарядів, що приводить до зникнення низькочастотної області дисперсії КДП, а наявність рівнів

захоплення виявляється в зміні величини її низькочастотного значення. Основний внесок в діелектричну дисперсію, яка відповідає ефекту перезарядки, дають глибокі рівні захоплення. Вплив мілких рівнів, енергетично віддалених від рівня (квазірівня) Фермі, незначний, так як вони практично повністю спорожені за рахунок теплової генерації.

Аналіз полідризаційних явищ для моделі напівпровідника, де значна присутність рекомбінаційних центрів привела до результатів подібних до одержаних для квазімонопольного випадку.

Рекомбінаційні центри, як правило, в процесі перезарядки приймають нееквівалентні кількості носіїв заряду із різних зон дозволених енергій. Переходи поміж рівнем та зонам, яка забезпечує більший приток носіїв заряду, повністю визначають полідризаційний заряд на ньому і відповідні цьому процесу діелектричні властивості. Обміном електронами з другою зоною можна знехтувати, тобто розглядати рекомбінаційні центри як рівні захоплення, подібні центрам прилипання. Якщо напівпровідникова фаза має велику їх концентрацію, то може здійснитися, як і для металічних включень, поверхневе екранування електричного поля.

В другій частині розділу приведені результати теоретичного дослідження впливу електронних процесів на межі розділу напівпровідникової фази - діелектрична матриця на діелектричні властивості неоднорідних систем.

Розвинуті методи розв'язання системи рівнянь (1) - (6) суттєво залежні від значення параметру  $L_3/d_n$  (де  $L_3$  і  $d_n$  - декабісова довжина екранування і середній лінійний розмір напівпровідникових включень). Випадок  $L_3/d_n \ll 1$  відповідає найбільш поширеним неоднорідним структурам (фотоприймачам на основі структур метал - діелектрик - напівпровідник - діелектрик - метал (МДНДМ), металоксидним варисторам, композиційним фотопровідниковим шарам і т.д.). Розрахункова схема, яка відповідає йому базується на зображенні концентрації вільних носіїв заряду і потенціалу в напівпровідниковому включенні у вигляді суперпозиції рівноважних (стаціонарних) об'ємних розподілів  $n_{ov}^{\pm}$ ,  $\psi_0$ , надлишкових над об'ємними, спадаючих до нуля за межами його приповерхневої області просторового заряду (ОПЗ)  $n_{os}^{\pm}$ ,  $\psi_0$  ( $\psi_0 = e\psi_0/kT$ ) і додатків  $n_{iv}^{\pm}$ ,  $\psi_1$  і  $n_{is}^{\pm}$ ,  $\psi_1$ , обумовлених їхньою деформацією збурюючим слабким змінним електричним полем. Об'ємні розподіли  $n_{iv}^{\pm}$  і  $\psi_1$  знаходяться розв'язанням системи рівнянь (1) - (6) в квазінейтральному об'ємі напівпровідника, де всі її коефіцієнти сталі. Вони повинні бути вибрані у

вигляді функція, які повільно змінюються в ОПЗ від координати, нормальної до поверхні напівпровідника. Враховуючи малу величину параметру  $L_p/d_n$ , такий підхід дозволяє знайти розподіл  $n^-(x,t)$  і  $\Psi(x,t)$  в ОПЗ, визначив їх через відповідні рівняння незбуреної задачі і об'ємні значення. Таким чином одержано вираз для високо-частотної електричної провідності системи напівпровідникових частинок  $\epsilon_h$  з використанням для повільно змінних від координат функція  $n_{ev}^-(x)$  і  $\Phi_1(x)$  рівень (1)-(6), які відповідають випадку, що не враховує електронні процеси на поверхні. Найбільш різка залежність  $\epsilon_h$  від поверхневого вигину енергетичних зон  $Y_{05}$  реалізується при збагачувачих його значеннях.

При аналізі діелектричної дисперсії, обумовленої перезарядкою ПЕС, для опису електропереносу в об'ємі напівпровідника використано рівняння дифузії нерівноважних електронно-діркових пар. Це забезпечило повільні зміни  $n_{ev}^-(x)$  і  $\Phi_1(x)$  та можливість застосування розподілу Больцмана для вільних носіїв заряду в ОПЗ в діапазоні частот  $\omega\tau_n \ll 1$ . Одержані рівняння, які встановлюють залежність між діелектричним спектром та параметрами електронних процесів в напівпровідниковій фазі і можуть бути зображені в такій формі для комплексної ємності  $C^* = C' - jC''$  МДПМ структури:

$$C^*/C_{\infty} = (C_n + C_A) / (C_n + B^* C_A), \quad (8)$$

де  $C_A$ ,  $C_n$  і  $C_{\infty}$  - еквівалентна ємність двох послідовно включених діелектричних шарів, напівпровідникового шару та структури при  $\omega \rightarrow \infty$ , і для МДП неупорядкованої системи сферичних напівпровідникових частинок в діелектричній матриці:

$$(\epsilon_A' / \epsilon^*)^{1/3} (\epsilon^* B^* - \epsilon_n') / (\epsilon_A' B^* - \epsilon_n') = 1 - p_v, \quad (9)$$

де  $p_v$  - об'ємна частка напівпровідникової фази. Параметр  $B^*$  має сенс оберненої величини ефективної ємності ізольованого напівпровідникового включення, нормованої до відповідної йому ємності при відсутності вільного заряду, і повністю визначає залежність імпеданса від фізичних параметрів напівпровідника:

$$B^* = (1/B_0 + A_v^* + A_s^*)^{-1}, \quad (10)$$

де

$$\frac{1}{B_0} = \frac{d_n}{n_c L^2 (dY_0/dx)|_s}; \quad A_v^* = \frac{d_n}{n_c L^2 (dY_0/dx)|_s} \left( - \sum_{i=1}^{N_v} N_{v,i} \frac{(1 - f_{v,i}^-) f_{v,i}^-}{1 + j\omega / \Omega_{v,i}} \cdot \frac{n_{v,i}^-}{n_0^-} \right);$$

$$A_S^* = \frac{d_n}{\pi_c L^2} \left[ \sum_{l=1}^{N_0^+} N_{sl} \frac{(1-f_{sl}^+) f_{sl}^+}{1+j\omega/\Omega_{sl}^+} + \sum_{l=1}^{N_0^-} N_{sl} \frac{(1-f_{sl}^-) f_{sl}^-}{1+j\omega/\Omega_{sl}^-} \right];$$

$dY_0/dx$  - перший інтеграл рівняння Пуассона в теорії ОПЗ;  $\pi_c$  і  $L$  - об'ємна концентрація і подвійна довжина екранування у власному напівпровіднику;  $\Omega_{sl}^\pm = c_{ql}^\mp (N_0^\pm + N_{ql}^\pm)$ ;  $N_0 = N_{0S}^\pm + N_{0V}^\pm$ ;  $f_{eqi}^\pm = N_0^\pm / (N_0^\pm + N_{qi}^\pm)$

Рівняння (10) відповідає випадку напівпровідника  $\mathcal{N}$ -типу. Воно описує дисперсійні області зв'язані з перезарядкою об'ємних та поверхневих рівнів захоплення, і залежність від  $Y_{0S}$  величини діелектричної проникності (або ємності) розглядаємих об'єктів.

Випадає, коли  $L_p/d_n \gg 1$ , має інтерес для аналізу електричної поляризації в тонкошарових і композиційних електролюмінесцентних структурах. Виконання цієї вимоги дозволить застосувати опис розподілу потенціалу в напівпровідникових включеннях в лінійній формі. Одержано вираз для  $B^*$ , який свідчить про те, що в вивчаємих об'єктах, поляризаційні явища зводяться здебільшого до перезарядки ПЕС. Їх специфічністю є досягнення  $\epsilon'$  (або  $C'$ ) на високих частотах свого мінімально можливого значення, яке відповідає відсутності вільних зарядів (так як останніх настільки мало, що вони не спроможні створити настільки суттєвий поляризаційний заряд на межі напівпровідника).

Установлено, що захоплення вільних носіїв заряду із напівпровідникової фази на ЛЕС в приповерхневому шарі діелектричної матриці, тобто створення "збудованого" заряду, значно впливає на властивості досліджених структур. Зокрема, це обусловлює аномальне (перевищуюче максимально можливе, оцінюване в теорії двохкомпонентних систем з провідними частинками) збільшення їх ефективної діелектричної проникності. Одержано вираз, який описує цей ефект. Відповідна йому діелектрична дисперсія є найбільш низькочастотною.

В третій розділі наведені результати теоретичних досліджень поляризаційних явищ, виникаючих при прикладенні постійного електричного поля  $E_0$ . І їх ролі в формуванні нелінійних польових ефектів в неоднорідних матричних структурах на основі напівпровідників.

Вплив  $E_0$  на емсійні характеристики вивчаємих об'єктів (емісійний ефект поля) має місце на низьких частотах ( $\omega \tau_M \ll 1$ ) та при  $L_p/d_n \ll 1$ . Конкретні вирази для параметра  $B^*$  в (8) і (9) знайдені розв'язаннями системи рівнянь (1) - (6) методом,

викладенні раніше, де врахована залежність  $n_{0i}^{\pm}$  і  $\gamma_{0i}$  від  $E_0$ . Присутність  $E_0$  не веде до суттєвих змін загальних закономірностей, з'ясованих раніше. Вольт-фарадна характеристика (ВФХ) шаруватої системи має вигляд симетричної кривої відносно  $E_0 = 0$ . Високочастотна ємність  $C_h$  збільшується з ростом  $E_0$ . Для домішкових напівпровідників може проявлятися ділянка ВФХ, де  $C_h$  зменшується з ростом  $E_0$ . Зниження концентрації ПЕС веде до росту чутливості  $C_h$  із зміною прикладеного постійного електричного поля. Вираз для  $V_0$  неупорядкованої системи сферичних напівпровідникових частинок в діелектричній матриці одержано з використанням для розподілу потенціалів зображень в вигляді розкладання в ряди Лежандра. В практично реалізованому випадку виснажуючого поверхневого викрилення енергетичних зон в напівпровіднику (для випадку  $n$  - типу)

$$1/\varepsilon_h'^{1/2} = 4(2\varepsilon_A E_0 / 3e\varepsilon_n' n_{0v} d_n)^{1/2}. \quad (II)$$

Побудована модель, яка описує струми термостимульованої деполаризації і відповідає одній із найбільш реальних ситуацій, коли напівпровідник має монополярну провідність і концентрація вільних носіїв заряду у ньому достатньо велика ( $L_3/d_n \ll 1$ ). Враховуючи, що під дією поля  $E_0$  з одного боку напівпровідникового включення утворюється позитивно заряджена область з виснаженням вигинів енергетичних зон, яка нейтралізується негативним зарядом на ПЕС з другого боку, із крайової умови для електричної індукції знайдено вираз для струму ТЦД:

$$J_{ТЦД} = -e\beta_T A \frac{d}{dT} \left[ \sum_{i=0}^{n-1} N_{si} (f_{si}^- - f_{si}^+) \right], \quad (12)$$

де  $f_{si}^- = f_{0si}^- + (f_{0si}^- - f_{0si}^+) \exp \left\{ -\int_{T_0}^T c_{si} [n_{0i} + N_{si}] dT / \beta_T \right\}$  (Індекси "0" і "E" визначають значення  $f_{si}^-$  в умовах рівноваги і поляризації для ПЕС у негативно зарядженого боку напівпровідникового включення);  $T_0$  і  $\beta_T$  - початкова температура і швидкість лінійного нагріву;  $A$  - коефіцієнт ( $A = 1$  для шаруватої і  $A = 1,125 \ln(1 - \rho_v)$  для дисперсної систем). Установлено, що для  $M_3 = 1$  і достатньо високих температур вираз (12) по формі температурної залежності відповідає відомому рівнянню Буччі.

Основна увага при розробці моделі, яка описує польову залежність електропровідності неупорядкованих матричних структур, приділена аналізу впливу поляризаційних явищ, зокрема, перезарядці ПЕС і ролі перколяційних ефектів в формуванні їх вольт-амперних характеристик (ВАХ). Для знаходження розподілу потенціалу в ок-

рем'ям потенціальної бар'єри, який являє собою тонкий діелектричний прошарок матриці з прилеглими до нього ОПЗ напівпровідникових частинок, використані умови неперервності потенціалу та електричної Індукції в наближенні, що ПЕС обмінюється електронами здебільшого з тою напівпровідниковою частинкою, якій належать (так як обмін з другою частинкою через діелектричний прошарок менш ймовірний). В рамках механізму електропереносу, який враховує тунелювання між зонами провідності частинок виявлено, що концентрація ПЕС  $N_3$  істотно впливає на форму ВАХ. При невеликих  $N_3$ , коли рівень ПЕС знаходиться нижче або поблизу рівня фермі, ВАХ має звичайну форму. З ростом  $N_3$  рівень ПЕС переміщується вище рівня фермі і ВАХ набуває опуклості при малих напругах  $U_0$ , а її висконалінійна ділянка зсувається в бік великих  $U_0$ . Істотно зміна абсолютних значень провідності має місце при варіації енергії іонізації ПЕС.

Перехід від ВАХ окремого бар'єра до вольт-амперної характеристики неупорядкованої системи виконано на основі зображення її ґратчастого моделю, де вузлами виступають напівпровідникові частинки, а зв'язками – потенціальної бар'єри. Враховуючи те, що основною причиною, яка відповідає за "експоненціально" велику неоднорідність є статистичний розкид товщин діелектричної прошаркової фази, одержано вираз для залежності струму  $I_0$  структури від прикладеного до неї поля  $E_0$  в параметричній формі

$$I_0 = g_p U_0 / Z^2; \quad E_0 = U_0 / Z, \quad (13)$$

де  $Z = d_0 (\xi_0 / \Delta \xi)^{\nu}$  – стала випадкової критичної підрешітки, яка являє протікання;  $g_p$  – провідність критичного потенціального бар'єру;  $\nu$  – індекс радіуса кореляції нескінченного кластера. Величина  $\Delta \xi$  в слабких полях приймалась рівною одиниці, а в діапазоні сильних полів при  $\xi_0 \gg \Delta \xi \gg 1$  –  $\Delta \xi = 0,5 \ln(g_{p0}/g_{p1})$  (індекси "0" і "1" – означають належність параметра низьконалінійній (омічній) або висконалінійній ділянкам ВАХ);  $\xi_0$  – інтервал зміни випадкової величини, яка має значення узагальненого коефіцієнта проникності розглядаємих тут бар'єрів. В відповідності з (13) ріст неупорядкованості системи ( $\xi_0$ ) веде до збільшення її ВАХ в бік менших  $E_0$  і зниження нелінійності.

В четвертій розділі викладені результати експериментальних досліджень та інтерпретації поляризаційних явищ в неоднорідних структурах. Об'єктами досліджень вибрані відомі, в найбільшій мірі відповідні моделі, яка тут розглядається, структури: компози-

ційні фотопровідникові (ФП) шарі на основі дрібнокристалічного сульфїду кадмїв І оксидно-цинкова варисторна кераміка.

На початку викладені основи експериментальних методик І особливості їх застосування до досліджуваних об'єктів. Зокрема, розглянуті питання вимірювань КЩП в діапазоні Інфренизьких частот з використанням струмів ізотермічної дєполяризації (ІТД) І обґрунтована коректність введення параметру – питома поверхність напівпровідникових частинок  $\beta_s$  у виладку  $L_0/d_n \ll 1$ , який відповідає дослідженим об'єктам.

Композиційні ФП структури являли собою статистичні системи дрібнокристалічних частинок компенсованого CdS (легованого міддю та галієм) в кремнійорганічному діелектриковій. В їх частотних залежностях  $\epsilon'$  І  $\epsilon''$  виявляються три області діелектричної дисперсії: високочастотна, маквеловського типу (I), низькочастотні, зв'язані з перезарядкою ПЕС (II), та "повільних" пасток в діелектричній матриці (III). Слабка залежність від освітленості значення  $\epsilon'_{10}$ , яке відповідає релаксаційному процесу (I), дозволила рахувати виконаноу умову  $\tau_{v1} < \tau_M$ , тобто прийняти, що в формуванні беруть участь об'ємні пастки (Індекс "h" І "l" відносяться до високочастотного І низькочастотного значень  $\epsilon'$  або  $\epsilon''$ , котрі визначаються Ів (8) та (9) відповідно). В темряві І при малих рівнях освітленості область (III) не розділяється (концентрація вільних носіїв заряду настільки мала, що  $\tau_{l1} \leq \tau_M$ ).

Висше викладена Інтерпретація діелектричних властивостей на основі уявлень, розвинутих в попередніх розділах, дозволила одержати оцінки ряду фізичних параметрів І характеристик розглянутого об'єкта (табл. I).

Наведені результати аналізу впливу технологічних факторів на лекс-амперні характеристики (ЛАХ). Одержані дані доводять, що в ролі глибоких об'ємних рівнів прилипання можуть виступати вакансії кадмїв.

Інтерпретація результатів експериментальних досліджень поляризаційних явищ в оксидно-цинковій кераміці (ОЦК) для варисторів проведена з врахуванням специфічності її структури (де за матрицю виступає діелектрична міхкрісталітна фаза, а включеннями відповідають кристаліти оксида цинку).

Частотні І температурні залежності  $\epsilon'$  І  $\epsilon''$  ОЦК виявляють чотири дисперсійні області: високочастотну (спад  $\epsilon'$  І ріст  $\epsilon''$  в діапазоні частот  $f > 10^7$  Гц), яка обумовлюється маквеловським розділенням вільних зарядів в кристалітах ZnO (I); максимум  $\epsilon''$  в діапазоні від  $10^4$  до  $10^6$  Гц (II). Інтерпретуемий стриб-

Таблиця I

Фізичні параметри композиційних фотопровідникових структур, одержані із аналізу поляризаційних явищ

Параметри	Розрахунковий метод	Використані експериментальні дані	Оцінки
Величина поверхневого вигину енергетичних зон $-\Phi_{0s}$ концентрація глибоких рівнів прилипання $-N_{vt}$ енергія іонізації $-\Delta E_{vt}$	Аналіз залежності $1/B_{vt}$ від $N_{ov}$ $\Delta E_{vt} = k \frac{\Delta E_n eV}{\Delta(\frac{1}{T})}$	Переміщення області діелектричної дисперсії (I) в залежності від зміни інтенсивності об'ємного фотозбудження та температури	$-\Phi_{0s} = 0,3 \dots 0,5 \text{ eV}$ $N_{vt} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $\Delta E_{vt} = 0,4 \text{ eV}$
Концентрація ПЕС поблизу квазірівня Сермі $-N_s$	$N_s = 3 \left( \frac{1}{B_{vt}} - \frac{1}{B_{sh}} \right) \frac{N_{ov} L_0^2}{a}$	Область діелектричної дисперсії (II) та її трансформація при зміні освітленості	$\frac{dN_s}{d\lambda} = \frac{N_{s0}}{k l_0} \exp\left(-\frac{\Delta E_s}{k l_0}\right)$ $N_{s0} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ $T_s = 670 \text{ K}$
Товщина "вбудованого" заряду $-\Delta d$	$\Delta d = \frac{2(1-p_v)a}{9\varepsilon_r p_v} \varepsilon_{2333}$	Область діелектричної дисперсії (III)	$\Delta d = (0,5 \dots 1) \cdot 10^{-4} \text{ см}$
Концентрація "повільних" пасток $-N_{ss}$ енергія іонізації $-\Delta E_{ss}$ коефіцієнт захоплення електронів $-C_{st}$	$N_{ss} = \frac{1}{e p_v A} \int_0^{\infty} j_{TCL} dT$ Апроксимація високотемпературного спаду піка температурної залежності струму ТСД виразом (I2)	Температурна залежність струму ТСД	$N_{ss} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ $\Delta E_{ss} = 0,4 \text{ eV}$ $C_{st} = 10^{-14} \text{ см}^3/\text{C}$

ками слабо зв'язаних заряджених частинок (електронів) в мікристиалітній фазі; максимум  $\varepsilon''$  в діапазоні інфрачервоних частот (IV), який пов'язаний з захопленням електронів із  $ZnO$  на ПЕС. В температурній залежності  $\varepsilon''$  зразків, виготовлених при відносно низьких температурах випалу, проявляється максимум (II) з енергією активації  $W_2 \approx 0,2 \text{ eV}$ , який передує максимуму (III) ( $W_3 \approx 0,4 \text{ eV}$ ) і зв'язується з перезарядкою об'ємних рівнів прилипання  $ZnO$ .

Розрахункові формули для таких об'єктів з виключно високою частотою напівпровідникових включень ( $p_v > 0,935$ ) повинні враховувати їх електричну взаємодію, що до теперішнього часу може бути

виконано тільки в різних наближеннях. При Інтерпретації електричних властивостей ОЦК відомі два підходи: напівемпіричний аналіз в рамках моделі елементарного мікрорезистора (шаруватої одстоєми напівпровідник - діелектрик - напівпровідник) з наступним переходом до системи кубічних включень І на основі розвинутої в цій роботі моделі сферичних напівпровідникових частинок різного розміру з статистичним розподілом. Останній підхід, як відомо, дозволяє наближено врахувати ефекти електричної взаємодії. Приймаючи до уваги, що ОЦК належить до висококонцентрованих систем, можна довести, що  $V^* = \epsilon'_n / \epsilon^*$ . Оцінки фізичних параметрів ОЦК, наведені в таблиці 2, одержані з врахуванням специфічності зонної схеми кристалітів ZnO (n-тип провідності, збіднючий поверхневий вигин енергетичних зон, об'ємна концентрація вільних електронів практично дорівнює концентрації об'ємних донорів). При опису області діелектричної дисперсії (Ш), зв'язаної з стрибковими процесами в в прошарковій фазі, використовувалось наближення Клаузюса-Мосоті.

В температурних залежностях струму І ТСД виявляється два піка. Слабка залежність високотемпературного піку від напруги поляризації  $U_{\text{пол}}$  визначає його обумовленість процесами перезарядки ПЕС. Для його аналізу використовувалась побудова аналогічна Еуччі, що дозволило одержати ряд параметрів ПЕС. Такі малі значення коефіцієнту захоплення електронів свідчать про належність ПЕС до "повільних", тобто вони можуть бути ідентифіковані з найбільш близькими до межі кристалітів стрибковими рівнями. Низькотемпературний пік збільшується з ростом  $U_{\text{пол}}$  по лінійному закону (тривалі часи поляризації) і Інтерпретований перезарядкою об'ємних рівнів прилипання.

Значна частина виконаних досліджень присвячена впливу технологічних факторів: температури випалу, хімічного складу, термообробки.

Одержані в цьому розділі оцінки відомих фізичних параметрів досліджених неоднорідних структур задовільно узгоджуються з літературними. Одержані вперше (параметри об'ємних, поверхневих та "повільних" пасток) відповідають існуючим фізичним уявленням. Це дозволяє зробити висновок про те, що розвинута модель поляризаційних явищ в неоднорідних об'єктах досліджуваного класу в достатній мірі адекватна.

В п'ятому розділі наведені результати вивчення поляризаційних явищ в системі метал - напівпровідник - метал на основі напівпровідників із стрибковим механізмом електропереносу. Об'єктом дос-

Фізичні параметри оксидно-цинкової кераміки для варисторів, одержані із аналізу поляризаційних ливів

Параметри	Розрахунковий метод	Використані експериментальні дані	Оцінки
Об'ємна електрична провідність кристалітів $Z_{п0} - \sigma_v$	$\sigma_v = \frac{6\pi\epsilon_0 f \epsilon_0^2 \epsilon_{12}^2 (\epsilon_{12} - \epsilon_{11})}{\epsilon_0^2 (\epsilon_{11} - \epsilon_{12})^2 \chi \epsilon_{11}^2 + 2\epsilon_{12} \nu \omega}$	Низькочастотний підйом області діелектричної дисперсії (I)	$\sigma_v = 0,1 \dots 1$ $\text{см}^{-1} \text{см}^{-1}$
Концентрація об'ємних рівнів прилипания кристалітів $- N_{vt}$ коefficient захоплення електронів $- c_{vt}$	$N_{vt} = \frac{D_{42} - 1}{D_{42}} \frac{n_{ov} E_{vt} + N_{vt}}{1 - f_{ov} t(Y_{vt})}$ $c_{vt} = \frac{2\alpha f_{2max}}{n_{ov} e^{Y_{vt}} + N_{vt}}$	Область діелектричної дисперсії (II) (для зразків з низькими температурами випалу)	$N_{vt} = 10^{13} \text{см}^{-3}$ $c_{vt} = 10^{-9} \text{см}^3/\text{с}$
Концентрація стрибкових центрів в міжкристалітній фазі $- N_{\Delta}$	$N_{\Delta} = \frac{216\epsilon_0 \epsilon_{\Delta max} kT}{(\epsilon_{\Delta 0})^2 (\epsilon_{\Delta 0} + 2)^2}$ де $\Delta a$ - відстань між центрами	Область діелектричної дисперсії (III)	$N_{\Delta} = (0,5 \dots 2) \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$
Концентрація глибоких ПЕС $- M_{st}$ коefficient захоплення $- c_{st}$	$M_{st} = \delta \left( \frac{1}{D_{42}} - \frac{1}{D_{41}} \right) \frac{n_{ov} L_s}{a}$ $c_{st} = \alpha f_{\Delta max} / n_{ov} \alpha \nu(Y_{st})$	Область діелектричної дисперсії (IV)	$M_{st} = (0,1 \dots 1) \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$ $c_{st} = 10^{-10} \text{см}^3/\text{с}$
Концентрація об'ємних донорів в кристалітах $- N_A$	Апроксимація експериментальних залежностей $1/\epsilon_{12}$ від $E_0$ виразом (II)	Вольт-Фарадна характеристика області діелектричної дисперсії (I)	$N_A = 10^{17} \text{см}^{-3}$
Енергія іонізації стрибкових центрів $- \Delta \epsilon_s$ коefficient захоплення електронів $- c_s$	Апроксимація високотемпературного максимуму температурної залежності струму TCD виразом (I2)	Температурна залежність струму TCD	$\Delta \epsilon_s = 0,4 \text{ eB}$ $c_s = 10^{-17} \text{см}^3/\text{с}$
Енергія іонізації об'ємних рівнів прилипания $- \Delta \epsilon_{vt}$	Метод Гарлика-Гібсона	Температурна залежність струму TCD (низькотемпературний пік)	$\Delta \epsilon_{vt} = 0,12 \text{ eB}$

ліджені були структури на основі оксидного ванадієво-фосфатного скла (ВФС) складу  $\approx V_2O_5 \cdot (1-x)P_2O_5$  (де  $x$  змінювався від 60 до 90 мол. %), у яких електрична поляризація обумовлена наявністю перехідних шарів (діелектричних зазорів) в контактах метал - напівпровідник. Вибір ВФС зв'язаний з перспективою розробки на їх основі нових приладів і особливостями механізму електропереносу (зокрема, міров участі в ньому іонів  $V^{4+}$ ), які ставлять їх в коло сучасних проблем фундаментальних досліджень в області фізики твердого тіла. Основна увага приділена застосуванню поляризаційних явищ до нетрадиційного визначення таких фізичних характеристик, як енергетичний спектр ЛЕС, концентрація електронів, що приймають участь в електропереносі, і т.д.

В частотних залежностях КДП структур платина - ВФС - платина виявляються дві області діелектричної дисперсії: високочастотна (діапазон радіочастот - І), яка відповідає максвелловському рівнянню рухомих зарядів і низькочастотна (ІІ), яка зв'язується з перезарядкою "повільних" ПЕС, розташованих в перехіднім шарі. З ростом прикладаної електричної напруги  $U_0$  опір структур зменшується від величини, яка відповідає опору контактних шарів  $R_2$ , до опору об'ємного шару  $R_V$ . Залежність ємності  $C_{12}$  від  $U_0$  має вигляд спадаючої в ІІ ростом функції. В температурній залежності струмів ТСД знайдені два піки: низькотемпературний, який зв'язується з поляризацією об'ємного заряду на межах ВФС, і високотемпературний, виявлений вперше і інтерпретований перезарядкою ПЕС контакту. Особливістю вивчаемого контакту є низький його опір, близький до  $R_V$ .

Еквівалентну електричну схему заміщення структури можна зобразити в вигляді двох, послідовно з'єднаних RC - кол, перше із яких має опір  $R_2$  і ємність контактних шарів  $C_2^*$ , а друге - опір  $R_V$  і ємність об'єму зразка  $C_V$ . Цей аналіз на низьких частотах з врахуванням того, що  $C_2^* \gg C_V (R_V/R_2)^2$ , дозволив одержати  $C_{12}^* = C_2^* (1 + R_V/R_2)^2$ ;  $U_{05} = U_0 \{1 - R_V / (R_V + R_2)\}$ , де  $U_0$  і  $U_{05}$  - напруги, які прикладаються до структури і до обох контактних шарів. Ємність  $C_2^*$  і напруга  $U_{05}$  окремого контакту знаходились на основі дослідження структур з різними площами контактів або шляхом виготовлення структур з одним смічним електродом, що досягалось нагріванням до температури 420 К.

Основні результати визначення фізичних параметрів досліджених оксидних систем одержані з використанням енергетичної схеми, яка відповідає невпорядкованому напівпровіднику з великою концен-

трацієм об'ємних ЛЕС, і увялень, викладених раніш. Відповідно цьому, вираз для частотної залежності комплексної ємності  $C_{\Sigma}^N$  в області діелектричної дисперсії (II) зображено в формі, подібній рівнянням (8), (10), де слід врахувати, що  $V_s = C_{\text{окз}} / (2C_n)$ ;

$$C_{\text{окз}} = (\epsilon \epsilon_A \epsilon_n' N_V / 2 \varphi_{s5})^{1/2} \cdot S \quad (S - \text{площа контакту}).$$

Застосування (10) з врахуванням того, що в перезарядці беруть участь здебільшого ПЕС близько розташовані до рівня Фермі, і  $N_V$  відповідає концентрації об'ємних іонізованих ЛЕС донорного типу в ОПЗ, дозволило одержати оцінки, наведені в таблиці 3 (де прийнято  $C_A \gg C_{\text{окз}}, C_{\text{ПЗС}}$ ).

Таблиця 3

Фізичні параметри оксидних ВЕС і контакту платина - ВЕС, одержані із аналізу поляризаційних явищ

Параметри	Розрахунковий метод	Використані експериментальні дані	Оцінки
Густина станів на рівні Фермі - $\rho(\epsilon_F)$	$\rho(\epsilon_F) = \frac{\delta C_{\Sigma} \epsilon^2}{e^2 \epsilon_A \epsilon_n' S^2}$	Область діелектричної дисперсії (I)	$\rho(\epsilon_F) = (1 \dots 10) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ eB}^{-1}$
концентрація носіїв заряду - $n_{\text{ов}}$	$n_{\text{ов}} \approx kT \rho(\epsilon_F)$		$n_{\text{ов}} = (0,1 \dots 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Концентрація ПЕС поблизу рівня Фермі - $N_{\Sigma F}$	$N_{\Sigma F} = \frac{16(C_{\Sigma F} - C_{\Sigma H})kT}{e^2 S}$	Область діелектричної дисперсії (II)	$N_{\Sigma F} = (1 \dots 2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
коefficient захоплення електронів - $C_{\Sigma F}$	$C_{\Sigma F} = \frac{\pi f_{\text{max}}}{kT \rho(\epsilon_F - e\varphi_{s5})}$		$C_{\Sigma F} = (0,1 \dots 10) \cdot 10^{-19} \text{ см}^3/\text{C}$
Поверхневий вигин енергетичних зон - $\varphi_{s5}$	Аналіз ВЕС контакту платина - ВЕС	ВЕС, область діелектричної дисперсії (I)	$\varphi_{s5} = 0,2 \text{ eB}$
Концентрація ПЕС - $N_S$ , енергія іонізації - $\Delta \epsilon_s$ , коefficient захоплення електронів - $C_S$	$N_S = \frac{1}{e \rho_{\text{ТД}} A} \int_{T_0}^{\infty} J_{\text{ТД}} dT$ Апроксимація високотемпературного максимуму температурної залежності струму ТД виразом (12)	Температурна залежність струму ТД	$N_S = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ $\Delta \epsilon_s = 0,14 \text{ eB}$ , $C_S \approx (0,1 \dots 1) \cdot 10^{-20} \text{ см}^3/\text{C}$

Виявлений високотемпературний пік струму ТД використано для оцінки параметрів ПЕС в відповідності з раніше описаною методикою.

В кінці розділу наведені результати досліджень впливу адсорбційних явищ на електричні властивості контакту платина - ВЕС.

При його поміщенні в вакуум, газове оточення, яке утримує донорні гази (водень, пари спирту), або яке має підвищену вологість, виявлено аномальне зменшення електричної провідності, ріст діелектричних втрат в діапазоні інфрачервоних частот та амплітуди високотемпературного піку струму ТСД. В атмосфері кисню має місце тільки часткове відновлення початкових характеристик. Адсорбція молекул водню веде до зміни енергетичного спектру ПЕС.

Запропонована інтерпретація аномальних (які не зміщуються в відому "бар'єрну" модель) газочувливих властивостей досліджених систем платина - ВЕС, побудована на моделі електропровідності контакту, яка враховує участь пересадочних "повільних" ПЕС в області перехідного його шару, в якості котрих виступають хемосорбовані молекули кисню. Зменшення їх концентрації в процесі поверхневих хімічних реакцій при адсорбції молекул донорних газів (зокрема, водню) відповідає зменшенню зазначених пересадочних ПЕС і росту опору структур.

Подібні газочувливі ефекти спостерігались в контактах платина - полікристалічна система  $V_2O_5 - SnO_2$ . Їх особливістю була значно більша здатність до відновлення початкового опору на повітрі після дії активного газу.

Шостий розділ містить результати застосування розвинутих моделей поляризаційних явищ до розроблення методів прогнозування характеристик приладів на основі матричних неоднорідних структур. В коло розглядаємих включені прилади, основані безпосередньо на використанні поляризаційних явищ (шаруваті, композиційні фотоспінюючі перетворювачі (ФСП) з об'ємним фотозбудженням) і прилади, в формуванні експлуатаційних характеристик яких зазначені ефекти мають визначну роль (металоксидні варистори (МОВ), електронні газочувливі детектори).

Для розрахунку основних характеристик ФСП: коефіцієнта перекидання по смістям, добротності, параметрів, які визначають швидкість їх дії, в діапазоні робочих частот (від  $10^3$  до  $10^8$  Гц), де переवरядка ЛЕС незначна, використані вирази (8) - (10).

Сформульований один із перспективних напрямків застосування ФСП з об'ємним фотозбудженням: побудова на їх основі смісних позиційно-чутливих фотоприймачів, які являють собою конденсатори, світлове смісність яких залежна від координати за рахунок освітлюваної площі. Наведена методика розрахунку функції перетворення і вибору оптимальних режимів роботи і схем виконання таких фотоприймачів.

Побудова моделі налінійності ВАХ МОВ на основі розвинутих загальних принципів вимагає визначення набору імовірних механізмів електропереносу через міжкристалітні потенціальні бар'єри (МПБ) і обґрунтування перколяційного характеру формування їх електропровідності. Серед багатьох запропонованих механізмів виділені термоелектронна емісія між атомами провідності двох сусідніх кристалітів (з урахуванням тунелювання через ОПЗ)  $j_{01}$ , переходи з участю ПЕС на межах кристалітів  $j_{02}$  і польова емісія із валентної зони одного кристаліта в вільну другого  $j_{03}$ . Аналізом одержаної на ція основі ВАХ окремого МПБ було встановлено, що вплив на розподіл електричного поля в ньому мають глибокі ПЕС, а переважний внесок в електропровідність здійснюють перехоплення через мілкі пастки. В діапазоні відносно низьких напруг сумарний струм визначається складовими  $j_{01}$  і  $j_{02}$ . Форма ВАХ зв'язана з концентрацією глибоких ПЕС в відповідності з законамирностями, описаними раніше. При великих їх концентраціях вплив перезарядки має місце до напруг, які не перевищують порогової ( $U_c = \Delta\epsilon_3 / e$ ,  $\Delta\epsilon_3$  - ширина забороненої зони), і в формування варисторної ділянки ВАХ МПБ визначальний внесок вносить складова  $j_{03}$ , що і приводить до спостерігаємої незалежності її положення від параметрів ПЕС і товщини прошаркової фази.

Експериментальні дослідження, приведені в цьому розділі дозволили виявити значний зв'язок випадково неупорядкованого характеру структури МОВ з виглядом їх статичних ВАХ. Виявлено зниження питомого опору МОВ  $\rho_y$  при фіксації густині струму зі зменшенням товщини зразку на варисторній ділянці його ВАХ. З ростом густоти струму  $J_0$  (а отже і  $E_0$ ) має місце послаблення указаної залежності.

Відомо, що електрична провідність випадково неупорядкованих структур визначається максимальним (пороговим) опором, який входить в критичну підрешітку. При зменшенні товщини зразка до розмірів періоду означеної підрешітки серед виникаючих "зрізаних" в напрямку електричного поля кластерів, завжди знайдеться такий, максимальний опір якого, нижче порогового, наслідком чого є зменшення  $\rho_y$ . Відмічене послаблення залежності  $\rho_y$  від товщини зразку з ростом  $J_0$  (або  $E_0$ ) пов'язано зі зменшенням періоду підрешітки (що вкладається в відомі теоретичні уявлення). Так як особливість МПБ в МОВ являється їх однакова висота (з урахуванням рівноважного поверхневого вигину енергетичних зон), то основною фізичною причиною, яка обумовлює неупорядковані властивості їх

структури, виступає флюктуаційний розкид товщин промаркованої фази, який і забезпечує експоненціально "велику" неоднорідність і дозволяє використати для опису ВАХ вираз (13).

Установлені ефекти зміншення ВАХ розглянутих структур в бік менших напруг і зменшення коефіцієнта нелінійності з ростом рівня їх неупорядкованості або температури, скорочення їх сублінійної ділянки зі збільшенням об'ємної концентрації електронів в кристалах.

Опис аномальних газочутливих властивостей систем метал-оксидний напівпровідник із стрибковим механізмом електропереносу виконано в рамках уявлень про участь в їх електропровідності пересадочних ЛЕС контактних перехідних шарів.

Розвинута модель застосована до Інтерпретації і прогнозу газочутливих властивостей структур платина - ВСС. При цьому використані загальноприйняті уявлення, що взаємодія металоксидних систем з активними газами (зокрема з воднем) при низьких температурах іде шляхом поверхневих хімічних реакцій в процесі їх адсорбції.

Попередньо хемосорбований кисень виконує роль сенсibiliзуючого поверхню газу. Концентрація пересадочних ЛЕС  $N_5$  відповідає концентрації хемосорбованих молекул кисню і знаходиться розв'язанням відповідного рівняння хімічної кінетики. Підстановкою  $N_5$  у вираз для малосигнальної провідності контакту одержана залежність останньої від часу та парціального тиску активного газу і проведено її дослідження.

В сьомому розділі сформульовано загальний підхід та приведені результати застосування поляризаційних явищ до розробки методів неруйнівного контролю неоднорідних матеріалів і виробів на їх основі.

Контроль виробів базується на вирішенні двох завдань: визначенні фізичних параметрів конкретного зразка і прогнозуванні на основі цих даних в рамках моделей, які маємо, його експлуатаційних характеристик. Такий підхід в ряді випадків (наприклад, при оцінці строку служби виробів) є практично єдиною можливим способом неруйнівного контролю. Для композиційних ШІ структур на основі дрібнокристалічного CdS і MOV на основі ZnO основна увага була приділена розв'язанню першого із названих завдань. Наведені одержані з використанням результатів попередніх розділів обґрунтування особливостей умов вимірювання, об'єму експериментальних даних і вибору розрахункових формул.

Фізичною основою контролю високодисперсного оксиду цинка, який використовується в виробництві МОВ є ріст при вакуумній термообробці числа вільних носіїв заряду в його частинках за рахунок зменшення кількості центрів їх захоплення (ПЕС адсорбційного походження). В рамках модифікованого методу термовакуумних кривих електропровідності, коли після вакуумної термообробки при підвищених температурах  $T_B$  вимір об'ємної електропровідності частинок пресованого зразку  $ZnO \epsilon_0$  здійснюється при більш низьких температурах ( $\sim 300$  К), знайдено наступне співвідношення:

$\ln \epsilon_0 = \text{const} - \Delta E_{EF} / kT_B$ , де  $\Delta E_{EF}$  - параметр, який контролюється (енергетична віддаль між рівнями глибоких ПЕС, що відповідають хемосорбції кисню, і Фермі). Нестехіометричний оксид цинку у якого  $\Delta E_{EF}$  більше, менше придатний до виробництва МОВ.

Контроль властивостей дрібнокристалічних порошків ФІ матеріалів по усередненій ЛАХ окремих їх частинок був втілений методом, оснований на фіксації здигу області діелектричної дисперсії, яка зв'язується з максвеловським розведенням вільних зарядів, в штучній дисперсній системі при варіації інтенсивності фотозбудження. Дисперсна система являла собою дрібнокристалічний порошок  $CdS$ , насипаний в вакуумний конденсатор з прозорими електродами.

Визначною особливістю застосування електричної провідності в цілях контролю якості оксидних каталізаторів є необхідність фіксації її абсолютного значення. Основні, виникаючі при цьому завдання, зв'язані з маючим місце розкидом густоти пресованих із високодисперсних порошків гранул каталізатора, особливістю механізму електропереносу для кожної конкретної каталітичної системи і, нарешті, з установленням кореляційних залежностей поміж значеннями електричної провідності і параметрами, які характеризують його активність. З позиції моделі матричної неупорядкованої двокомпонентної структури, де перша компонента - частинки каталізатора, а друга - повітряне середовище, перше з означених завдань було розв'язано шляхом знаходження із експериментальних даних вимірювань діелектричних характеристик і наскрізної провідності зразків питомої електричної провідності матеріалу каталізатора в діапазоні високих частот  $\epsilon_{kh}$  і на постійному струмі  $\epsilon_{x0}$ . Дослідження системи  $NiO - ZrO_2$  проведено шляхом аналізу залежностей  $\epsilon_{kh}$  і  $\epsilon_{x0}$  від процентного вмісту  $NiO$  (ж). Виявлений мінімум  $\epsilon_{x0}$  в діапазоні  $\approx 50$  в.с. %  $NiO$  дозволив зробити висновок про те, що  $\epsilon_{x0}$  формується високоємними бар'єрами утвореного твердого розчину  $NiO \cdot ZrO_2$  на межах компонент каталізатора при його

виготовленні (що згодом було підтверджено дослідженнями ІК - спектрів, рентгеноструктурного аналізу та ін.). Для нікель-цирконієвого каталізатора установлено, що з ростом його питомого опору спостерігається збільшення виходу цільового продукту. Причина цього ефекту - підвищення рівня дисперсності каталізатора, який приводить до збільшення фази твердого розчину в складі каталізатора.

Для оксидного мідь-цинк-алюмінієвого каталізатора утворення твердих розчинів не виявлено і залежності від складу  $\delta_{\text{хн}}$  і  $\delta_{\text{хo}}$  ідентичні. Однак, тут спостерігається паралельне зменшення константи швидкості реакції і означених електропровідностей з ростом температури виготовлення.

Важливе місце в розробці методів контролю, основаних на використанні поляризаційних явищ, займають питання автоматизації. Їх особливістю є необхідність одночасного вимірювання кількох величин і математичної обробки, яка проводиться здебільшого по відносно складним алгоритмам.

Одним із напрямків розв'язання сформульованого завдання є розробка інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які дозволяють здійснювати неперервний контроль того чи іншого параметра. Йому відповідає приведене технічне рішення контролю об'ємної електропровідності кристалів оксиду цинка в МОВ. Принцип його роботи міститься в автоматизації описаних раніше вимірювальних операцій, що виконуються при визначенні  $\delta_v$ , шляхом перетворення аналогових сигналів, які відповідають параметрам  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$ , в цифрову форму і передаються в обчислювальний пристрій.

Другий напрямок - це створення ІВС, які забезпечують фіксацію багатьох фізичних величин, що характеризують об'єкт і містять в собі крім комплексу цифрових вимірювальних приладів, також пристрій узгодження і мікроЕОМ, яка призначена для проведення аналізу і обробки експериментальних даних по алгоритмам практично необмеженої складності. В викладеному технічному рішенні ввід даних в вхідний порт мікроЕОМ здійснюється шляхом відкривання - закриття буферних регістрів. Їх входи з'єднані з цифровим виходом вимірювальних приладів, керування якими здійснюється програмно через порт виводу мікроЕОМ і додатковий дешифратор.

Програмне забезпечення для такої ІВС на базі мікроЕОМ відповідає одночасному розв'язанню двох основних завдань: первинній статистичній обробці даних і безпосереднього визначення контролюваного фізичного параметру.

Розроблена автоматизована система контролю здійснює визна-

чення таких важливих фізичних параметрів МОВ як поверхневий вигин енергетичних зон, об'ємна концентрація донорів, коефіцієнт захоплення електронів і концентрація глибоких ПЕС в відповідності з методами, наведеними в таблиці 2. Ця програмне забезпечення містить статистичну обробку даних з використанням лінійних моделей і більш складних алгоритмів, що охоплюють аналіз релаксаційних залежностей струмів ІТД, розрахунок на їх базі частотних залежностей коефіцієнта діелектричних втрат в діапазоні інфранизьких частот (область діелектричної дисперсії ІУ), та визначення параметрів діелектричного спектру шляхом ідентифікації їх моделі Коула-Коула.

### ВИСНОВКИ

1. Розвинута концепція розв'язання сформульованої в найбільш загальному вигляді системи рівнянь, які описують поляризаційні явища в ізольованому напівпровідниковому об'ємі і базуються на відомих математичних методах збурень та малого параметру, дозволила здійснити моделювання означених явищ в неоднорідних структурах, відповідних системі напівпровідникових вклучень в діелектричній матриці, і розробити методи прогнозування їх електричних властивостей.

2. Детально теоретично досліджена роль процесів дрейфу, дифузії і захоплення на локалізовані електронні стани в створенні і розподілу поляризаційного заряду в розглянутих об'єктах і в формуванні таких їх характеристик, як спектр комплексної діелектричної проникності, вольт-фарадні і вольт-амперні характеристики, температурна залежність струму термостимульованої деполіризації.

Виявлено, що в змінних електричних полях кожен тип вільних носіїв заряду або локалізованих електронних станів (в об'ємі і на поверхні напівпровідникової фази або в прикордонному шарі діелектричної матриці) припускає прояв в спектрі комплексної діелектричної проникності відповідної йому області діелектричної дисперсії. Ці області, зв'язані з перезарядкою означених станів, більш низькочастотні. Оптимальними умовами їх прояви є висока об'ємна частка напівпровідникової фази в системі і енергетична близькість рівнів локалізованих електронних станів і фермі.

Виявлено визначальний вплив поверхневих електронних станів на формування нелінійних польових ефектів в розглядаємих структурах: з ростом концентрації означених станів, здатних до перезарядки, послаблюється польова залежність ємності; спостерігається

здви́г вольт-амперної характеристики в бік більших напруг; виявляється і підсилюється їм відповідний пік в температурній залежності струму термостимульованої деполаризації.

3. На основі розвинутих теоретичних уявлень виконані експериментальні дослідження, які дозволили виявити і вивчити ряд вище названих ефектів, обумовлених поляризаційними явищами в відомих матеріалах електронної техніки: композиційних фотопровідникових шарах на основі дрібнокристалічного сульфїду кадмію і оксидно-цинковий варисторній кераміці. Запропоновані і апробовані розрахункові вирази для оцінки їх фізичних параметрів (об'ємної електропровідності, поверхневого вигину енергетичних зон, концентрації об'ємних донорів і глибоких центрів приляпання напівпровідникової фази, параметрів поверхневих електронних станів та інших).

4. Досліджені особливості поляризаційних явищ в структурах на основі напівпровідників з стрибковим електропереносом (на прикладі шаруватої системи платина-оксидне ванадієво-фосфатне скло - платина).

Установлено загальний характер з аналогічними явищами в структурах на основі зонних напівпровідників: і особливості, які витікають із відсутності шару підвищеного опору (поверхневого потенціального бар'єру для електронів, що беруть участь в стрибковій електропереносі). Виявлено аномальне зменшення провідності вичаємого об'єкту в атмосфері водню. Дана інтерпретація цього ефекту зменшення кількості пересадочних центрів, які приймають участь в електропереносі через контакт метал - склоподібний напівпровідник, в процесі поверхневої хімічної реакції при адсорбції водню.

5. Розроблені методи прогнозування характеристик електронних елементів на базі неоднорідних структур, зокрема, амності, добротності, коефіцієнту перекривання по ємностям, параметрів швидкості дії шаруватих і композиційних фотоемісійних перетворювачів, профілів шілин світлового зонду і функція перетворення ємнісних позиційно-чутливих фотоприймачів на їх основі. Прогнозування вольт-амперних характеристик і їх коефіцієнта нелінійності металоксидних варисторів на основі оксиду цинка виконані в рамках розробленої перколяційної моделі електропровідності неупорядкованої структури. Обґрунтовані можливості застосування контактів платина - ванадієво-фосфатне скло як активних елементів газочутливих датчиків.

6. Розвинуті фізичні основи методів нарушівеного контролю

якості неоднорідних об'єктів розглядаемого типу шляхом оцінки по вимірам фізичних параметрів і використання відповідних моделей їх експлуатаційних характеристик. Запропоновано комплекс експериментальних методик для контролю основних фізичних параметрів композиційних фоточутливих структур і металоксидних варисторів.

Розроблені методи контролю якості по електричним вимірам конкретних порошкоподібних напівпровідників: оксиду цинку, дрібнокристалічного сульфіді кадмію, оксидних каталізаторів, виготовлених плазмохімічним методом.

7. Сформульовані шляхи і результати автоматизації методів контролю властивостей неоднорідних структур, що використовують поляризаційні явища. Технічне рішення, яке відповідає неперервній фіксації окремого фізичного параметра (об'ємної електричної провідності кристалітів оксиду цинка в згаданих варисторах) ґрунтується на перетворенні сигналів апаратними засобами в відповідності з алгоритмом конкретного методу. Для контролю комплексу параметрів оксидно-цинкових варисторів реалізована програмно керована система з послідовним алгоритмом вимірювань і статистичної обробки, яка використовує декілька методик (температурної залежності електропровідності, часової залежності струмів ізомерічної деполіризації і вольт-фарадних характеристик).

Основний зміст дисертації опубліковано в таких роботах:

1. Черненко І.М., Тонкошкур А.С. Об импедансе МДПДМ-структуры // Радиотехника и электроника. - 1976. - Т.21, №6. - С. 1347-1349.

2. Черненко І.М., Тонкошкур О.С. Залежність електропровідності порошкоподібного напівпровідникового матеріалу від вигину енергетичних зон на його поверхні // Український фізичний журнал. - 1976. - Т.21, №11. - С. 1794-1797.

3. Тонкошкур А.С., Черненко І.М. Влияние поверхностной электрической проводимости на диэлектрические характеристики полидисперсных полупроводников // Изв. вузов СССР. Физика-1976. №11. - С. 26-30.

4. Тонкошкур А.С. Влияние процессов рекомбинации и прилипания на диэлектрические явления в дисперсных полупроводниковых структурах / Изв. вузов СССР. Физика. - Томск, 1977. - 8 с. Деп. в ВИНИТИ 14 июля 1977 г., № 3172-77.

5. Фотоваракторные структуры на основе сульфида кадмия / Е. Ф. Афонько, А.С. Тонкошкур, И.М. Черненко, А.Я. Якунин // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. - 1978. - №(122).

- С. 59-61.

6. Тонкошкур А.С. Влияние перезарядки локальных центров на диэлектрические явления в дисперсных полупроводниковых структурах // Укр. физ. журнал. - 1978. - Т. 23, №12. - С. 2030-2038.

7. Температурный коэффициент сопротивления высоколинейных оксидно-цинковых резисторов / Б.И. Авдеенко, А.С. Тонкошкур, И.М. Черненко, А.М. Ивон, А.И. Целоков // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. - 1980. - №4(41). - С. 17-19.

8. Тонкошкур А.С. Вольт-фарадная характеристика неоднородной структуры // Укр. физ. журнал. - 1981. - Т. 26, №10. - С. 1740-1743.

9. Авдеенко Б.И., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. О природе диэлектрических потерь в нелинейной оксидно-цинковой керамике на радиочастотах // Диэлектрики и полупроводники. - 1981. - №20. - С. 3-6.

10. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С., Якунин А.Я. Диэлектрическая дисперсия, обусловленная перезарядкой ловушек в фотопроводниковых структурах на основе микрокристаллического сульфида кадмия // Изв. вузов СССР. Физика. - 1982. - №1. - С. 85-86.

11. Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Определение электрической проводимости проводящих включений в неоднородных материалах // Заводская лаборатория. - 1982. - №1. - С. 31-32.

12. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С., Якунин А.Я. Особенности остаточной проводимости в фотопроводниково-диэлектрических структурах на основе CdS // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1982. - №5. - С. 872-873.

13. Авдеенко Б.И., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Диэлектрические потери в оксидно-цинковой керамике // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1982. - №6. - С. 1028-1031.

14. Тонкошкур А.С. Диэлектрическая дисперсия в неоднородных структурах на основе полупроводников с произвольной концентрацией ловушек // Материалы и приборы радиоволновой электроники. - Днепропетровск: Днепропетровский гос. ун-т. 1982. - С. 46-50.

15. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С. Влияние перезарядки локальных центров на электрические свойства неоднородных фотопроводниковых структур на основе CdS // Физ. и техн. полупроводников. - 1982. - Т. 16, №10. - С. 1899-1901.

16. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С., Якунин А.Я. Электрические свойства гетерогенных фотоваракторных структур на основе CdS // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 1982. - №1. - С. 66-69.

17. Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Вольт-фарадная характеристика симметричной структуры полупроводник - диэлектрик// Диэлектрики и полупроводники. - 1983.-№23.-С. 63-68.

18. Макаров В.О., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Токи деполяризации в структурах металл - ванадиево-фосфатное стекло - металл // Укр. физ. журнал. - 1983, -Т. 27, №3.- С. 380-382.

19. Макаров В.О., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Определение емкостным методом плотности локализованных состояний в ванадиево-фосфатных стеклах// Диэлектрики и полупроводники. 1983.-№24,- С. 53-55.

20. Электрические свойства контакта металл - ванадиево-фосфатное стекло в различных газовых средах/ В.О. Макаров, И.Д. Сейковский, А.С. Тонкошкур, И.М. Черненко// Изв. вузов СССР. Физика. - 1983. - №6. - С. 3-6.

21. Тонкошкур А.С. Токи термостимулированной деполяризации в неоднородных структурах // Укр. физ. журнал.-1984. -Т.29,№2.- С. 244-247.

22. Макаров В.О., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Энергетический спектр локализованных состояний в ванадиево-фосфатных стеклах// Укр. физ. журнал.-1984.-Т. 29, №3. -С. 440-443.

23. Электрические свойства оксидных никель-циркониевых катализаторов, полученных термообработкой сырья в высокоэнтальпийном газе. Сообщение I/ А.С. Тонкошкур, П.Н. Цыбулев, А.В. Гершун, И. С. Лейнов, В.Д. Пархоменко // Вопросы химии и химической технологии. - 1984.-№76.-С. 107-110.

24. Тонкошкур А.С. Моделирование влияния поверхностной базы на электропроводность многокомпонентных полупроводниковых материалов // Материалы и приборы радиоэлектроники. - Днепропетровск: Днепропетровский гос. ун-т. - 1985. - С. 24-29.

25. А.С. И1886114 СССР, МКИ<sup>4</sup>301 №27/02. Газочувствительный элемент / В.О. Макаров, А.С. Тонкошкур, И.М. Черненко. - Опубл. 30.10.85, БИ №40.

26. Влияние высокотемпературного обжига на свойства оксидно-цинковой керамики / Б.Н. Авдеенко, В.О. Макаров, С.Ф. Скляр, А.С. Тонкошкур, И.М. Черненко// Изв. АН СССР. Неорганические материалы. -1986.- №7.- С. 1230-1232.

27. Макаров В.О., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Высокотемпературный максимум тока термостимулированной деполяризации в структурах металл - ванадиево-фосфатное стекло - металл// Укр. физ.

журнал. - 1986. - Т. 32, №2. - С. 284-287.

28. А.С. 125656 СССР, МКИ<sup>4</sup> 601 R 31/00. Стенд для измерения частотных характеристик диэлектрических двойств веществ / Б.И. Авдеенко, И.М. Черненко, С.Ф. Склар, А.С. Тонкошкур, - Опубл. 23.10.86. - ЕИ №39.

29. Электрические свойства медь-цинк-алюминиевого катализатора, полученного термоллизом солей в высокотемпературном газе / В.Д. Пархоменко, П.Н. Цыбулев, А.С. Тонкошкур, В.А. Поп, С.Ф. Склар // Вопросы химии и химической технологии. - 1986. - №6. - С. 99-101.

30. Макаров В.О., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Влияние термообработки в вакууме на электропроводность оксида цинка // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1987. - №2. - С. 2016-2020.

31. Макаров В.О., Тонкошкур А.С.; Черненко И.М. Влияние термовакуумной обработки на электрические свойства оксидно-цинковых варисторов // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. - 1988. - №1(70). - С. 18-20.

32. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С., Якунин А.Я. Влияние легирующих примесей на параметры фотоваркаторных композиционных структур на основе CdS // Диэлектрики и полупроводники. - 1987. - №33. - С. 62-64.

33. Тонкошкур А.С., Склар С.Ф., Афонько Е.Ф. Влияние "встроенного" заряда на диэлектрические явления в неоднородных структурах матричного типа // Изв. вузов СССР. Физика. - 1988. - №8. - С. 108-109.

34. Тонкошкур А.С., Макаров В.О., Черненко И.М. Особенности вольт-амперных характеристик контакта металл-полупроводниковое ванадиево-фосфатное стекло // Укр. физ. журнал. - 1988. - Т.33, №11. - С. 1710-1712.

35. Электрические свойства оксидных никель-циркониевых катализаторов, полученных термообработкой сырья в высококонтальпийном газе. Сообщение 2 / А.С. Тонкошкур, А.В. Гершун, П.Н. Цыбулев, В.Д. Пархоменко // Вопросы химии и химической технологии. - 1988. - №8. - С. 82-87.

36. Тонкошкур А.С., Афонько Е.Ф. Диалектометрический контроль свойств полупроводниковых материалов // Оптический, радиоволновый и тепловой методы неразрушающего контроля: Тез. докл. Всес. н.-т. конф. - Могилев, 1979. - Ч.2. - С. 9.

37. Тонкошкур А.С. Анализ данных диалектометрического контроля

о применении ЗВМ//Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля: Тез. докл. Всес. н.-т. конф. - Могилев, 1979. - Ч. 2. - С. 27.

38. Тонкошкур А.С. Влияние перезарядки ловушек на вольт-амперные характеристики барьеров в неоднородных структурах матричного типа// Изв. вузов СССР. Физика. - 1990. - №5. - С. 109-111.

39. Тонкошкур А.С. Перколяционные эффекты в электропроводности варисторной керамики на основе оксида цинка // Физ. тв. те-ла. - 1990. - Т. 32, №8. - С. 2260-2263.

40. Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Газочувствительные эффек-ты в структурах на основе оксидных полупроводниковых систем  $V_2O_5-SnO_2$  // Журн. техн. физики. - 1990. - Т. 60, №8. - С. 188-190.

41. Афонько Е.Ф., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. Фотоэкс-тные позиционно-чувствительные датчики на основе композиционных материалов // Тез. докл. конф. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпо-ненты. - 1989. - №1(300). - С. 59.

42. Тонкошкур А.С. К анализу фотоэкснтных преобразователей на основе структур полупроводник - диэлектрик// Диэлектрики и по-лупроводники. - 1990. - №38. - С. 53-58.

43. Тонкошкур А.С. Электрические методы определения физичес-ких параметров варисторных материалов на основе  $ZnO$  // Диэлект-рики и полупроводники. - 1990. - №39. - С. 51-57.

44. Тонкошкур А.С. Вольт-амперная характеристика оксидно-цин-кового варистора// Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и ра-диокомпоненты. - 1991. - №2(83). - С. 15-19.

45. Тонкошкур А.С. Диэлектрическая дисперсия, обусловленная перезарядкой поверхностных ловушек в гетерогенных электролюминес-центных структурах// Тез. докл. 10-я Всес. конф. по электролюминес-ценции - Ангарск, 1991. - С. 54.

46. Тонкошкур А.С., Прошкин Ю.А., Черненко И.М. Автоматизация измерений физических параметров оксидно-цинковых варисторов// Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. - 1992. - №1(86). - С. 28-31.

47. Статистический подход к оценке методов неразрушающего контроля стабильности оксидно-цинковых варисторов/ А.С. Тонкошкур, А.В. Ткачук, А.И. Ивон, В.Ф. Катков, Л.В. Кашковская, И.М. Чернен-ко// Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. - 1992. - №1(86). - С. 62-64.

469437

AV 26.446

**AV 26.446**