

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису
УДК 539.2:621.315:535

МЕЛЬНИЧУК ЛЮДМИЛА КЮЇВНА

АНІЗОТРОПІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ПЛАЗМОН-ФОНОННИХ ПОЛЯРИТОНІВ
МОНОКРИСТАЛІВ ОКИСУ ЦИНКУ

01.04.07 - фізика твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1996



Дисертація є рукопис.

Роботу виконано в Українському державному педагогічному університеті імені М.П. Драгоманова та Інституті фізики напівпровідників НАН України.

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук, професор Венгер Євгеній Федорович,
доктор фізико-математичних наук, професор Пасічник Юрій Архипович.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор Фекешгаві Іштван Вінцевич,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Довбешко Галина Іванівна.

Провідна організація: Інститут фізики НАН України.

Захист відбудеться "19" квітня 1996 р. о 14¹⁵ год. на засіданні Спеціалізованої наукової ради К 50.07.02 при Інституті фізики напівпровідників НАН України за такою адресою: 252650, Київ-28, проспект Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України (252650, Київ-28, проспект Науки, 45).

Автореферат розісланий "19" березня 1996 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради,

кандидат фізико-математичних наук

Рудько Г.Ю.

ДВ-34.203

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науковий напрямок - оптика поверхні твердого тіла - бурхливо розвивається з 70-х років, оскільки спостерігається до цих пір підвищений науковий інтерес до явищ на поверхні твердого тіла, зокрема, до вивчення взаємодії електромагнітних хвиль із коливаннями кристалічної ґратки і носіями зарядів в кристалах.

Актуальним залишається питання визначення оптичних та електрофізичних властивостей анізотропних напівпровідників неруйнівними методами спектроскопії інфрачервоного (ІЧ) відбивання і поверхневих поляритонів (ПП). Під поверхневими поляритонами розуміють змішані електромагнітно-механічні коливання, максимум амплітуди поля яких знаходиться на поверхні твердого тіла і амплітуда поля експоненціально зменшується від межі поділу середовищ.

ПП в ізотропних твердих тілах на даний час вивчені достатньо добре в роботах Бриксіна В.В., Мирліна Д.Н. та ін. В значно меншій мірі досліджені ПП в анізотропних кристалах, при вивченні яких проявляється ряд нетривіальних особливостей (анізотропія дисперсійних залежностей поверхневих плазмон-фононних поляритонів (ППФП), залежність кількості дисперсійних віток від концентрації електронів та орієнтації оптичної вісі кристала відносно напрямку розповсюдження ППФП, анізотропія коефіцієнтів затухання звичайних і незвичайних ППФП та ін.). При дослідженні впливу анізотропії фононної та плазмон-фононної підсистем на дисперсію, коефіцієнти затухання та інші характеристики ППФП зручним модельним кристалом є окис цинку. Монокристали окису цинку кристалізуються в структурі вюрциту в просторовою групою $C_{6v}^4(P6_3mc)$. ZnO характеризується значною анізотропією властивостей фононної і плазмон-фононної підсистем. Область використання окису цинку визначається поєднанням різноманітних хімічних і фізичних властивостей, а практичне використання ПП ZnO обмежене їх невивченістю.

На початку виконання даної роботи існували лише суперечні дані стосовно спектра коливань ґратки монокристалів ZnO. Питання анізотропії ефективної маси вільних носіїв зарядів і коефіцієнтів затухання фононів та плазмонів, коефіцієнтів затухання ППФІ окису цинку при різних орієнтаціях оптичної вісі С відносно хвильового вектора в літературі взагалі не розглядались.

Мета роботи. Дослідження впливу анізотропії фононної та плазмон-фононної підсистем на дисперсійні залежності і коефіцієнти затухання поверхневих плазмон-фононних поляритонів на прикладі окису цинку.

Об'єкт дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі використовувались гексагональні монокристали окису цинку, одержані гідротермальним методом, з розмірами $10 \times 8 \times 8$ мм³ і концентрацією електронів від 10^{16} до 5×10^{19} см⁻³.

Експериментальні методи та апаратура. Спектри інфрачервоного відбивання і порушеного повного внутрішнього відбивання (ППВВ) монокристалів окису цинку реєструвались спектрометрами SPECORD-M80, ИКС-29М з використанням приставок ИПО-22 і НПВО-2 в діапазоні $200-4000$ см⁻¹ при температурі 293 К. Для обробки експериментальних даних широко застосовувались математичні методи з використанням ЕОМ.

Наукова новизна роботи.

1. Проведено дослідження спектрів ІЧ відбивання ZnO в діапазоні $200-4000$ см⁻¹ при зміні концентрації вільних носіїв зарядів від 10^{16} до 5×10^{19} см⁻³ при ЕІС і Е||С. Визначені коефіцієнти анізотропії ефективних мас електронів $m_{\perp}^*/m_{\parallel}^*=1,15$ і коефіцієнтів затухання плазмонів $\gamma_{\text{рI}}/\gamma_{\text{рII}}=1,1$ для монокристалів ZnO.

2. Встановлена залежність кількості дисперсійних віток ППФІ та їх граничних значень частот в монокристалах ZnO від концентрації електронів. Збільшення концентрації електронів в монокристалах ZnO від 2×10^{18} супроводжується формуванням нової дисперсійної вітки ППФІ 3 типу.

3. Запропоновано неруйнівний метод визначення концентрації та рухливості носіїв зарядів в одновісних полярних напівпровідниках.

4. Досліджені залежності коефіцієнтів затухання поверхневих фононних та плазмон-фононних поляритонів першого і другого типів в ZnO від концентрації вільних носіїв зарядів. Одержані дисперсійні залежності та умови існування ППФП 1-3 типів при зміні концентрації електронів від 10^{16} до 5×10^{19} см^{-3} . ПП 2 типу ZnO існують в діапазоні $380-412$ см^{-1} при орієнтації $K||C$ і $xy||C$.

5. Показано, що при збільшенні концентрації електронів в монокристалах ZnO від 2×10^{16} см^{-3} до $6,6 \times 10^{17}$ см^{-3} для ППФП 2 типу спостерігається збільшення коефіцієнтів затухання ППФП від $3,8$ до $5,5$ см^{-1} .

6. Збільшення концентрації електронів в монокристалах ZnO від 10^{16} до 5×10^{19} см^{-3} при ЕІС призводить до збільшення коефіцієнта відбивання в області мінімуму залишкових променів від $0,1$ до 56% і коефіцієнта затухання оптичних фононів γ_{ϕ} від 11 до 40 см^{-1} .

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Анізотропія ППФП в монокристалах ZnO визначається переважно анізотропією фононної підсистеми.

2. Наявність затухання в анізотропних напівпровідниках призводить до генерації поверхневих поляритонів в околі "точки зупинки", яка для реальних кристалів не є особливою.

3. В сильно легованих гексагональних монокристалах ZnO при орієнтації $K||C$ і $xy||C$ існують ППФП трьох типів, які збуджуються в різних частотних діапазонах.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вперше вивчені властивості ППФП в гексагональних монокристалах ZnO. Одержані результати дозволили глибше зрозуміти фізичні процеси, які відбуваються біля поверхні кристалів. При використанні одержаних в роботі значень коефіцієнтів анізотропії ефек-

тивних мас електронів $m_I^*/m_{II}^*=1.15$ і коефіцієнтів затухання плазмонів $\gamma_{PI}/\gamma_{PII}=1.1$ досліджені дисперсійні залежності ППФП 1-3 типів.

Запропонований безконтактний спосіб вимірювання концентрації n_0 та рухливості μ носіїв зарядів в полярних анізотропних напівпровідникових матеріалах дає можливість розширити діапазон вимірювання концентрації та рухливості вільних носіїв зарядів, підвищити точність вимірювання n_0 і μ . Виконана робота доказує доцільність порівняння на ЕОМ експериментальних і розрахункових спектрів відбивання, ППВВ і дисперсійних залежностей ППФП анізотропних одновісних напівпровідників при визначенні параметрів монокристалів.

Особистий внесок автора дисертації: Найбільш суттєві наукові результати, отримані автором, відображені в розділах наукова новизна роботи і в положеннях, які виносяться на захист. Автором особисто одержані дисперсійні залежності і коефіцієнти затухання поверхневих плазмон-фононних поляритонів (ППФП) 1-3 типів монокристалів окису цинку в залежності від концентрації вільних носіїв зарядів, орієнтації хвильового вектора ППФП відносно осі C і поверхні кристалу. Автор провела розрахунки на ПЕОМ дисперсійних залежностей і спектрів ППФП, прийняла участь в експериментальних дослідженнях спектрів відбивання і поверхневих поляритонів, в обговоренні одержаних результатів та оформленні результатів наукової роботи.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на XI і XII Міжнародній школі-семінарі "Спектроскопія молекул та кристалів" (Харків, 1993 та Ніжин, 1995), IV, V і VI-Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993-1995 рр.), Шостому Міжнародному Симпозіумі "Тонкие пленки в электронике" (Лазурне, 1995), Міжнародному семінарі "Спектральные и химические методы анализа: техника и практика" (Ялта, 1995), SPIE's International Conference on "Optical Diagnostics of Materials and Devices for

Opto-, Micro-, and Quantum Electronics" (Kiev, 1995), II Українській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1993), II Всеукраїнській конференції, присвяченій 75-річчю УДПУ ім. М.П. Драгоманова (Київ, 1995), Міжвузівській конференції "Науково-технічна творчість молоді" (Київ, 1992).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 20 робіт, список яких подано в кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, заключення, списку публікацій автора, списку цитованої літератури. Робота викладена на 147 сторінках машинописного тексту, в роботі 37 рисунків і 10 таблиць. Список цитованої літератури включає 102 найменування.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється мета і задачі досліджень, вказується наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, перелічуються основні положення, висунуті на захист, реферативно викладений зміст дисертації і приводяться відомості щодо апробації роботи.

В першій главі дисертації дається огляд робіт, в яких характеризуються методи визначення оптичних і електрофізичних параметрів анізотропних твердих тіл. Обґрунтовано вибір об'єкта дослідження. Представлена методика вирощування та обробки поверхні монокристалів ZnO. Експериментально підібрані умови вирощування монокристалів ZnO гідротермальним методом дозволили вперше одержати монокристали окису цинку високої якості розмірами $10 \times 8 \times 8 \text{ мм}^3$ при зміні концентрації вільних носіїв зарядів від 10^{16} до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Поліруючі травники вводять вплив дефектів поверхні до мінімуму.

Значна увага зосереджена на аналізі методів вимірювання спектрів ІЧ відбивання і поверхневих поляритонів анізотропних

напівпровідників в області залишкових променів при різних орієнтаціях поверхні кристала. Похибка вимірювання коефіцієнтів відбивання в поляризованому світлі 1-2%. Роздільна здатність в діапазоні 200-4000 см^{-1} і см^{-1} .

Розроблено програми порівняння експериментальних і розрахункових спектрів відбивання і поверхневих поляритонів на ЕОМ в метю одержання електрофізичних параметрів досліджуваних монокристалів ZnO при ЕІС і ЕІІС.

Друга глава дисертації присвячена дослідженню анізотропії електрофізичних параметрів монокристалів ZnO та її впливу на властивості поверхневих плазмон-фононних поляритонів.

На спектрофотометрі SPECORD-M80 в поляризованому світлі проведені вимірювання спектрів ІЧ відбивання монокристалів окису цинку при орієнтаціях ЕІС і ЕІІС в діапазоні частот 200-4000 см^{-1} і концентраціях електронів в кристалах від 10^{16} до 5×10^{19} см^{-3} . Коефіцієнт поляризації 98%. За допомогою дисперсійного аналізу спектрів відбивання в області залишкових променів монокристалів ZnO та використанні ЕОМ одержані взаємно узгоджені параметри кристала (табл.1).

Таблиця 1. Взаємно узгоджені параметри одноосцеляторної моделі монокристала ZnO (T=293 K)

ZnO	ϵ_0	ϵ_{∞}	$\nu_T, \text{см}^{-1}$	$\nu_L, \text{см}^{-1}$
ЕІС	8,1	3,95	412	591
ЕІІС	9,0	4,05	380	570

Встановлена зміна характеру спектрів ІЧ відбивання з ростом легування для монокристалів ZnO. Проведені розрахунки спектрів ІЧ відбивання в області залишкових променів ZnO по одноосцеляторній моделі показують, що суттєвий вплив на величину коефіцієнта відбивання спостерігається при концентраціях елект-

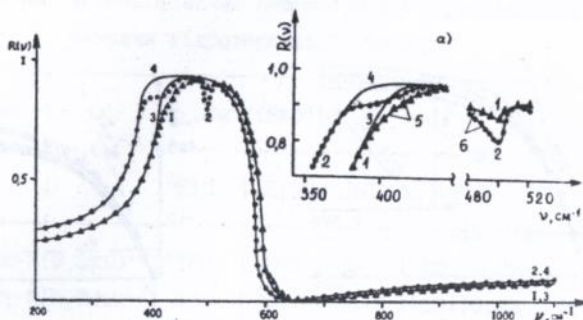


Рис.1. Спектри ІЧ відбивання окису цинку (зразок ZО2-3) при ЕІС і Е||С. Експеримент: 1. ЕІС; 2. Е||С.

Розрахунок: 3. ЕІС, $\nu_{PI}=90 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_{PI}=150 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_{\Phi I}=11 \text{ см}^{-1}$; 4. Е||С, $\nu_{PII}=100 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_{PII}=170 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_{\Phi I I}=11 \text{ см}^{-1}$, $\delta=2,9 \times 10^{-3}$; а) $R(\nu)$ збільшено в 2 рази.

ронів $\rho_0 > 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для $\nu_{PI}=250 \text{ см}^{-1}$ (при $\nu_{PI}=\gamma_{PI}$) проявляються відмінності в області частот 200-350 см^{-1} . Це свідчить, що при $\nu_{PI} > 200 \text{ см}^{-1}$ дисперсійний аналіз спектрів відбивання $R(\nu)$ дозволяє з достатньою точністю визначити частоту плазмового резонансу ν_p , коефіцієнти затухання плазмонів γ_p та їхні коефіцієнти анізотропії. Використання поліруючих травників зводить вплив дефектів поверхні до мінімуму, про що свідчить мале значення коефіцієнта середнього квадратичного відхилення δ при порівнянні експериментальних і розрахункових спектрів (рис.1).

Фононна анізотропія властивостей слабо легованих монокристалів ZnO спостерігається на частотах 200-560 і 700-1100 см^{-1} (рис.1). Як показав експеримент, монокристали ZnO характеризуються сильною анізотропією коливальних спектрів ґратки. В області 580-660 см^{-1} в спектрах ІЧ відбивання зареєстровано прояв анізотропії коливального спектра кристала і плазми носіїв зарядів. Анізотропія оптичних властивостей плазмонів проявля-

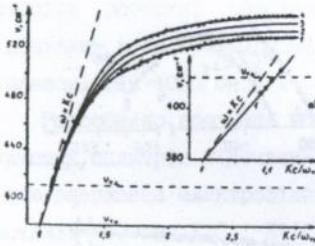


Рис.2. Дисперсійні залежності $v_s(K)$ ППФП ZnO (зразок Z02-3): 1-4 - $\varphi=0, 30, 60, 90^\circ$. Точки-експеримент, лінії-розрахунок. $1-v_{пф}=543,6 \text{ см}^{-1}$, $2-v_{пф}=557,5 \text{ см}^{-1}$. а) $\varphi=0^\circ$ (K||C,xy||C).

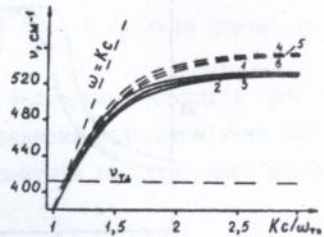


Рис.3. $v_s(K)$ ППФП ZnO. Розрахунок: 1-3- $v_p=v_p=1 \text{ см}^{-1}$, $v_{пф}=539,2 \text{ см}^{-1}$; 4-6- $v_p=v_p=500 \text{ см}^{-1}$, $v_{пф}=568,5 \text{ см}^{-1}$; 1,4- $\theta=0^\circ$; 2,5- $\theta=45^\circ$; 3,6- $\theta=90^\circ$.

ється у різних значеннях плазмової частоти ν_p і коефіцієнтів затухання плазмонів γ_p (при EIC і EIIC) кристалів окису цинку.

Збільшення концентрації електронів до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ призводить до збільшення γ_ϕ від 11 до 40 см^{-1} . Аналіз спектрів відбивання (рис.1) показав, що $\gamma_{\phi I} = \gamma_{\phi II}$. Вперше методом дисперсійного аналізу спектрів відбивання для монокристалів окису цинку (табл.2) одержані значення рухливості та питомої провідності, значення анізотропії коефіцієнтів затухання плазмонів $\gamma_{pI}/\gamma_{pII}=1.1$ та ефективних мас електронів $m^*_{I}/m^*_{II}=1.15$.

В главі представлені дослідження властивостей ППФП гексагональних монокристалів ZnO при використанні в розрахунках даних табл.1 і 2. Вперше одержано дисперсійні залежності та коефіцієнти затухання ППФП для довільних орієнтацій поверхні кристала відносно вісі C і напрямку розповсюдження ПП.

Таблиця 2. Електрофізичні параметри монокристалів ZnO, отриманих гідротермальним методом

N	Зра - вок	$n_o, \text{см}^{-3}$	$\mu_L, \text{см}^2/(\text{Вхс})$		$\beta_o, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$		m^*_{II}	m^*_I/m^*_{II}
			E C	E C	E C	E C		
1.	ZO2-3	$9,3 \times 10^{16}$	150	167	22	25	0,21	1,23
2.	ZO1-3	$6,6 \times 10^{17}$	80	96	85	101	0,23	1,13
3.	ZO6-B	$2,0 \times 10^{18}$	74	50	237	243	0,22	1,18
4.	ZC1M	$4,2 \times 10^{18}$	2,2	-	148	-	-	-
5.	ZO9	$5,0 \times 10^{19}$	1,5	-	1250	-	-	-

Для монокристалів ZnO методом ПШВ одержані дисперсійні залежності $\nu_S(K)$ ПШП 1 та 2 типу при різних значеннях θ і ϕ (рис.2). Точками позначені експериментальні дані для зразка ZO2-3. Криві 1-4 (лінії) розраховані для $\phi=0,30,60,90^\circ$. Розрахунок проведено при використанні загальної теорії поверхневих поляритонних станів в анізотропних кристалах. Отримані граничні частоти поверхневих поляритонів (криві 1-4) $\nu_{пф}$ відповідно дорівнюють 543,6 і 557 см^{-1} .

На рис.2 в збільшеному масштабі показана частина $\nu_S(K)$ в області частот 380-420 см^{-1} (вставка а). Для ZnO в діапазоні від 380 до частоти 412 см^{-1} при $K||C, x||C$ проявляються ПШП 2 типу, існування яких обмежено умовами $\epsilon_x < 0, \epsilon_z > \epsilon_x^2$. Точками показані експериментальні дані для частот $\nu_S(K)$ ПШП 2 типу, які співпадають з розрахунком. $\nu_S(K)$ ПШП 1 типу ($\epsilon_x < 0$ і $\epsilon_z < 0$) починаються з частоти 412 см^{-1} . Експериментальна залежність $\nu_S(K)$ (точки 1, $\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$) неперервна.

Досліджені дисперсійні залежності $\nu_S(K)$ окису цинку без вільних носіїв зарядів (розрахунок при $\nu_p=1 \text{ см}^{-1}$) (криві 1-3, рис.3) і зразка ZO6 з $n_o=2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (криві 4-6). Частота гра-

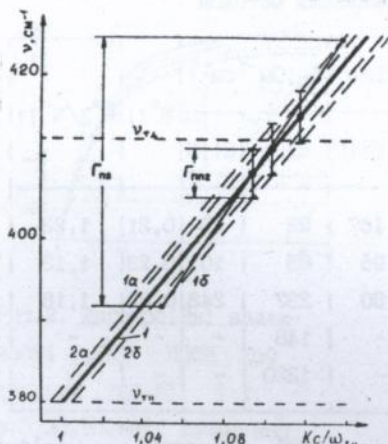


Рис. 4. $\nu_s(K)$ ППФІ-2 ZnO (зразок Z01, $n_0=6,6 \times 10^{17}$ см^{-3}): 1, 2а, 2б розрахунок; точки-експеримент; 1а, 1б-області визначення "істинної" ширини спектра.

ничного поверхневого поляритона $\nu_{\text{пф}}=539,2 \text{ см}^{-1}$ (криві 1-3). Криві 4-6 одержані при $\nu_0=500 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{\text{пф}}=568,5 \text{ см}^{-1}$ для різних кутів θ (рис.3). Наявність носіїв зарядів в концентрацією електронів в зоні провідності $n_0=2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ призводить до зміни частоти поверхневого плазмон-фононного коливання на 29 см^{-1} . Рис.3 показує, що частота поверхневого граничного поляритона не залежить від величини кута θ .

Для нелегованого та сильно легovanого окису цинку (зразки Z02-3 та Z01) графічним методом одержані значення коефіцієнтів затухання $\Gamma_{\text{пф}}$ ППФІ 1 та 2 типу (рис.4).

Глава 3 присвячена дослідженню поверхневих плазмон-фононних поляритонів в гексагональних монокристалах ZnO. На основі теорії Гуревича і Тарханяна проведено дослідження ППФІ монокристалів ZnO, який характеризується значною анізотропією фононної підсистеми. Наявність анізотропії в ZnO приводить до появи нових дисперсійних віток, число яких залежить від концентрації вільних носіїв зарядів, від орієнтації кристала та від відносного розміщення частот $\nu_{\text{T.L.II}}$; $\nu_{\text{L.L.II}}$; $\nu_{\text{P.L.II}}$; $\nu_{\text{L.II}}^{+-}$:

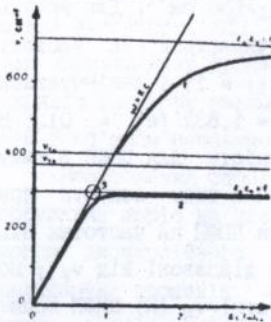


Рис.5. $v_S(K)$ ПЖКІ ZnO для орієнтації KIC,xyIC: $v_{PI}=605 \text{ см}^{-1}$; $v_{PII}=650 \text{ см}^{-1}$.

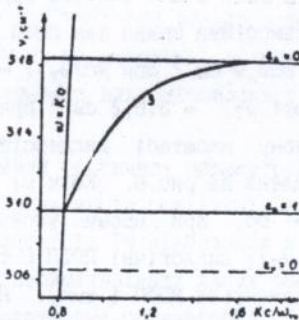


Рис.6. $v_S(K)$ ПЖКІ ZnO (зривок ZC1M): $3. v_{I}^{-}=318,4 \text{ см}^{-1}$; $Kc/\omega_{TII}=1,632$ ($\epsilon_I=0$); $\Omega_{II}^{-}=309,9 \text{ см}^{-1}$, $Kc/\omega_{TII}=0,815$ ($\epsilon_{II}=1$); $v_{II}^{-}=306,5 \text{ см}^{-1}$, $Kc/\omega_{TII}=0,017$ ($\epsilon_{II}=0$).

$\Omega_{I, II}^{+, -}$. Останні 8 величин визначаються співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \epsilon_I(v_{I}^{+, -})=0, \quad \epsilon_{II}(v_{II}^{+, -})=0, \quad \epsilon_I(\Omega_{I}^{+, -})=1, \quad \epsilon_{II}(\Omega_{II}^{+, -})=1, \\ v_{I, II}^{+, -}=(1/2)^{1/2}\{(v_{LI, II})^2+(v_{PI, II})^2 \pm \\ \pm [((v_{LI, II})^2+(v_{PI, II})^2)^2-4(v_{PI, II})(v_{TI, II})^2]^{1/2}\}^{1/2}. \end{aligned}$$

При цьому максимальне число віток в полярних напівпровідниках може бути 4. Для монокристалів окису цинка невиконання умови $\Omega_{II}^{+} < v < v_{I}^{+}$ призводить до існування тільки трьох дисперсійних віток $v_S(K)$. Табл.1 показує, що для ZnO виконується співвідношення $v_{TI} < v_{TII} < v_{LII} < v_{LI}$.

Дисперсійні вітки розпочинаються на частотах $v=0$, $v=v_{TI}$ ($\epsilon_I=\infty$) і $v=\Omega_{II}^{+}$, $v=\Omega_{II}^{-}$ ($\epsilon_{II}=1$). Встановлено, що високочастотна вітка v^{+} починається в точці $v=v_{TI}$. При $K \gg \omega/c$ частота ПЖКІ асимптотично наближається до значення v^{+} . Низькочастотна вітка v^{-} існує при всіх значеннях K.

Розрахунок $v_S(K)$, проведений для зривка ZC1M, показує наявність трьох дисперсійних залежностей (рис.5, криві 1-3). $v_{пф}^{+}=719 \text{ см}^{-1}$ (крива 1), $v_{пф}^{-}=305 \text{ см}^{-1}$ (крива 2). Встановлено,

що ПМКП 3 типу в ZnO існують при умові $\nu_{p1} > 550 \text{ см}^{-1}$. Для зразка ZC1M дисперсійна крива для ПМКП 3 типу починається на частоті $\Omega_{II}^- = 309,9 \text{ см}^{-1}$ при $Kc/\omega_{TII} = 0,815$ ($\epsilon_{II} = 1$) і закінчується на частоті $\nu_1^- = 318,4 \text{ см}^{-1}$ при $Kc/\omega_{TII} = 1,632$ ($\epsilon_I = 0$). В збільшеному масштабі дисперсійна залежність для ПМКП 3 типу представлена на рис.6. Коли $\nu_1^- > \nu_{TII}$ ПМКП 3 типу існують при $Kc/\omega_{TII} \rightarrow \infty$, при цьому умови існування ПМКП на частотах від Ω_{II}^- до ν_{TII} аналогічні ПМКП 2 типу, а в діапазоні від ν_{TII} до ν_1^- проявляються ПМКП 1 типу. Низькочастотні $\nu_S^-(K)$ ПМКП починаються на частотах $\nu > 0$, коли $\alpha^2 > 1$. При збільшенні концентрації носіїв зарядів початок $\nu_S(K)$ зміщується від 0,54 до 9,5 см^{-1} .

При використанні даних зразка ZC1M вперше розраховано спектр ППВВ ПМКП 3 типу. Спектр ПМКП-3 одержано при $\gamma_{\Phi I} = \gamma_{\Phi II} = 6 \text{ см}^{-1}$ і $\gamma_{pI} = \gamma_{pII} = 1 \text{ см}^{-1}$ при куті падіння випромінювання в елементі ППВВ $\alpha = 28^\circ$ і величині зазора між елементом і зразком $d = 26 \text{ мкм}$. Мінімум спектра ПМКП-3 на частоті $\nu_3 = 312,5 \text{ см}^{-1}$ при $Kc/\omega_{TII} = 0,92$.

Глава 4 присвячена практичному використанню результатів дослідження взаємодії ІЧ випромінювання з приповерхневим шаром напівпровідникових матеріалів. В главі представлено неруливіний спосіб визначення концентрації n_0 і рухливості μ вільних носіїв зарядів в полярних напівпровідникових матеріалах. Показано, що для полярного напівпровідника достатньо виміряти коефіцієнт відбивання $R(\nu)$ на частотах ν_1 і ν_2 , тоді за допомогою ЕОМ одновначно визначається концентрація і рухливість вільних носіїв зарядів в кристалі.

$$\nu_1 = \nu_{\min} = \nu_T [(\epsilon_0 - 1) / (\epsilon_{00} - 1)]^{1/2},$$

$$\nu_2 = \nu_{\min} - (\nu_{LI} / \nu_{LII}) * 10.$$

Метод апробовано для монокристалів ZnO і SiC 6H.

В роботі досліджені фізичні процеси модуляції ІЧ випромінювання при збудженні методом ППВВ плазових поверхневих і хвилевідних поляритонів (ХПП) на поверхні і в тонких плівках напівпровідників. Визначені умови існування ХПП. Одержані диспер-

сійні залежності ХПП. Проведено порівняльний аналіз характеристик модуляційних процесів при зміні концентрації вільних носіїв зарядів за умови взаємодії модулюючого випромінювання з поверхнею і об'ємом речовини.

Розроблений спосіб визначення оптичних параметрів тонких порушених шарів на поверхні полярних напівпровідників за допомогою дисперсійного аналізу спектрів ІЧ відбивання в області валишкових променів. Аналіз експериментальних даних вказує на прояв в області $380-480 \text{ см}^{-1}$ додаткових осциляторів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено вплив анізотропії фононної та плазмон-фононної підсистем на дисперсійні залежності і коефіцієнти затухання поверхневих плазмон-фононних поляритонів (на прикладі окису цинку).

1. Досліджені спектри ІЧ відбивання монокристалів окису цинку, отриманих гідротермальним методом, при $E \perp C$ і $E \parallel C$ в діапазоні $200-4000 \text{ см}^{-1}$ при зміні концентрації електронів від 10^{16} до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Вперше методом дисперсійного аналізу спектрів ІЧ відбивання одержані взаємно узгоджені параметри кристала ZnO. Визначені коефіцієнти анізотропії ефективних мас електронів $m^*_I/m^*_{II}=1.15$ і коефіцієнтів затухання плазмонів $\gamma_{PI}/\gamma_{PII}=1.1$.

2. Проведені дослідження поверхневих плазмон-фононних поляритонів гексагональних монокристалів ZnO при довільних орієнтаціях вісі C відносно хвильового вектора ПППІ. Розраховані дисперсійні залежності ПППІ ZnO при використанні одержаних параметрів в застосуванням загальної теорії поверхневих поляритонів в анізотропних кристалах.

3. Встановлено, що збільшення концентрації електронів від 2×10^{16} до $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в монокристалах ZnO призводить до збільшення граничної частоти ПППІ на 29 см^{-1} . ПППІ другого типу існують в області частот $380-412 \text{ см}^{-1}$ при орієнтації $K \parallel C$, $xy \parallel C$.

Досліджені поверхневі плазмон-фононні поляритони 1 і 2 типу в анізотропному ZnO. Отримані дисперсійні залежності і коефіцієнти ватування ППМІ 2 типу.

4. Показано, що максимальна кількість віток в монокристалах окису цинку рівна 3. Визначені умови існування третьої вітки ППМІ-3. Одержані дисперсійні залежності ППМІ 3 типу при рівних концентраціях носіїв зарядів в ZnO. Розраховані спектри ППМІ третього типу.

5. Запропонований спосіб вимірювання концентрації і рухливості вільних носіїв зарядів.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Анизотропия электрофизических свойств монокристаллов окиси цинка // ФТТ.-1994.- **36**, №9.- С. 2624-2633.
2. Venger E.F., Melnichuk A.V., Melnichuk L.Ju., Pasechnik Ju.A. Anisotropy of the ZnO single crystals reflectivity in the region of region of residual rays // Phys. Stat. Solidi (b).-1995.- **188**, N.2.-P. 118-127.
3. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Отражательная способность монокристаллов окиси цинка в области остаточных лучей // Квантовая электроника.-1995.- Вып.47. С. 70-74.
4. Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Влияние анизотропии на дисперсионные зависимости поверхностных плазмон-фононных поляритонов окиси цинка // ФТТ.-1996.- **38**, №2.- С. 262-264.
5. Мельничук А.В., Венгер Е.Ф., Мельничук Л.Ю., Нимчин В.П., Пасечник Ю.А. Поверхностные поляритоны в сильно легированном карбиде кремния // Оптическая спектроскопия: Сб. научных трудов.-К.:Институт физики АН У.-1993.- **2**.- С. 315-329.

6. Venger E.F., Burshta I.I., Melnichuk A.V., Melnichuk L.Ju., Pasechnik Ju.A. Use of surface excitation in semiconductor materials for modulation of IR radiation// PROCEEDINGS, SPIE, International Conference on "Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro-, and Quantum Electronics.-1995, 11-13 May, Kiev, Ukraine.- 2648, N2.-P. 447-453.
7. Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Пасічник Ю.А. Дослідження анізотропних монокристалів оксиду цинку методом спектроскопії поверхневих поляритонів// Ніжин. Наукові записки. Збірник наукових праць.-1994.-XIV.- С. 83-86.
8. Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Пасічник Ю.А. Метод обробки спектральної інформації при вивченні основ оптики твердого тіла// Ніжин. Наукові записки. Збірник наукових праць.-1994.-XIV.-С. 132-136.
9. Венгер Е.Ф., Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Пасічник Ю.А. Дослідження коефіцієнтів затухання поверхневих поляритонів в одновісних полярних напівпровідниках//Ніжин. Збірник наукових праць.-1995.-XV.-С. 116-121.
10. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Способ измерения концентрации и подвижности носителей зарядов в полярных полупроводниковых материалах//Записка на винахід N95020608 від 10.02.1995 р.
11. Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Німчин В.П., Пасечник Ю.А. Поверхностные поляритоны в гексагональном оксиде цинка //Препринт N8-92, К.: - КТТИ им.М.Горького.-1992.- 34 с.
12. Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Влияние анизотропии на поверхностные поляритоны в монокристаллах окиси цинка //Препринт N4-95, К.: - УГПУ им.М.П.Драгоманова.-1995.-27 с.
13. Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Поверхностные плазмон-фононные поляритоны в монокристаллах

- окиси цинка //Препринт N16-95.-К.: - УГПУ им .М.П. Драгоманова.-1995.-30 с.
14. Мельничук Л.Ю. Плазмон-фононна взаємодія в об'ємі і на поверхні окису цинку// Збірник наукових праць.-К.: -УДПУ ім. М.П. Драгоманова.-вип. N1.-С. 249.
 15. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Німчин В.П., Пасечник Ю.А. Оптические свойства тонких пленок оксида цинка на сапфире в ИК области спектра//Материалы IV международной конференции "Физика и технология тонких пленок",Ив.- Франковск.-1993.- ч.2.- С. 396.
 16. Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Німчин В.П., Пасічник Ю.А. Поверхневі поляритони в анізотропних монокристалах оксиду цинку //Тези доп. XI- Української школи-семінару "Спектроскопія молекул та кристалів", Харків. 10-16 травня 1993 р.-С. 125.
 17. Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Німчин В.П., Пасічник Ю.А. Вплив сильного легування гексагональних монокристалів окису цинку на властивості поверхневих плазмон-фононних поляритонів// Тези доп. II-Української конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу".-Ніжин, 21-24 вересня 1993.- ч.2.-С. 158.
 18. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Поверхностные плазмон-фононные поляритоны в гексагональных монокристаллах окиси цинка // Тез.доп. XII-Міжнародної школи семінара "Спектроскопія молекул та кристалів", Ніжин, 3-8 липня, 1995.-С. 76.
 19. Венгер Е.Ф., Мельничук О.В., Мельничук Л.Ю., Пасічник Ю.А. Звичайні та незвичайні поверхневі плазмон-фононні поляритони в карбіді кремнію й окису цинку// Тез.доп. семінара "Спектральные методы анализа: техника и практика" Республіка Крим, Ялта, 26-28 вересня 1995.-С. 8.

20. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Мельничук Л.Ю., Пасечник Ю.А. Исследование электрофизических свойств тонких пленок методами спектроскопии поверхностных и волноводных поляритонов//Матеріали VI Міжнародного симпозіуму "Тонкіє пленки в електроніці". Лавурне, Україна, 25-29 вересня 1995.-1.-С. 167-168.

Melnichuk L.Yu. Anisotropy of the surface plasmon-phonon polaritons in zinc oxide single crystals. Candidate of the physico-mathematical sciences (field 01.04.07-solid state physics) Thesis (typescript). Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1996. 20 research papers are defended which contain the results of investigating the effect of the phonon and plasmon-phonon subsystem anisotropies in zinc oxide single crystals on dispersion and other characteristics of the surface plasmon-phonon polaritons (SPPP). The mutually consistent zinc oxide parameters were determined by dispersion analysis of the experimentally found and theoretically calculated IR reflection spectra in the Reststrahlen region. For E||C and E||C both mobility and conductivity were calculated for zinc oxide single crystals having different electron concentrations. The investigations of type 1 and 2 SPPP in heavily doped anisotropic zinc oxide single crystals were carried out. It was found that SPPP-2 exist in ZnO in the 380 to 412 cm^{-1} range for K||C and xy||C orientations. The damping coefficient dependence on the electron concentration was studied for SPPP-1(2) in ZnO. Increasing the electron concentration from 2×10^{18} to $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ is accompanied by formation of a new dispersion branch (SPPP-3). A non-destructive method is proposed to find charge carrier concentration and mobility in uniaxial polar semiconductors.

Мельничук Л.Ю. Анизотропия поверхностных плазмон-фононных поляритонов монокристаллов окиси цинка. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07-физика твердого тела. Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1996. Защищается 20 научных работ, которые содержат результаты исследования влияния анизотропии фононной и плазмон-фононной подсистем монокристаллов окиси цинка на дисперсию и другие характеристики ППМП. Методом дисперсионного анализа экспериментальных и расчетных спектров ИК отражения в области остаточных лучей определены взаимно согласованные параметры окиси цинка. Рассчитаны подвижность и удельная проводимость монокристаллов окиси цинка при E||C и E⊥C с различной концентрацией электронов. Проведены исследования поверхностных плазмон-фононных поляритонов 1 и 2 типов в сильно легированных анизотропных монокристаллах окиси цинка. Установлено, что ППМП-2 для ZnO существуют в диапазоне 380-412 см⁻¹ при ориентации K||C и ху||C. Исследованы зависимости коэффициентов затухания поверхностных фононных и плазмон-фононных поляритонов первого и второго типов в ZnO от концентрации электронов. Повышение концентрации электронов от 2х10¹⁸ до 5х10¹⁹ см⁻³ сопровождается формированием новой дисперсионной ветви (ППМП-3). Предложен неразрушающий метод определения концентрации и подвижности носителей зарядов в одноосных полярных полупроводниках.

Ключові слова: фізика, окис цинку, монокристал, тверде тіло, анізотропія, поверхневі поляритони, відбивання, дисперсійна залежність, ефективна маса, коефіцієнти затухання.

Мз —

Підписано до друку 15.03.1996 р. Об.О.9. Формат 60x84 1/16.

Друк офсетний. Тир. 100. Зам. 52. Безкоштовно.

ДОД УДПУ ім. Драгоманова, Київ, Пирогова, 9.

ABSTRACT

445046

AB 34.283