О.В. МЕЛЬНИЧУК, 1 Л.Ю. МЕЛЬНИЧУК, 1 Н.О. КОРСУНСЬКА, 2 Л.Ю. ХОМЕНКОВА, 2 Є.Ф. ВЕНГЕР 2

¹ Ніжинський державний університет ім. М. Гоголя (Вул. Графська, 2, Ніжин 16600)

² Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (Просп. Науки, 45, Київ 03028)

ОПТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЬ–ZnO/SiO₂ В ІЧ-ОБЛАСТІ СПЕКТРА

За допомогою методу IЧ-спектроскопії зовнішнього відбивання досліджено оптичні та електрофізичні властивості плівок оксиду цинку, легованого тербієм. Плівки було нанесено на підкладки оксиду кремнію методом магнетронного напилення. Теоретичне моделювання спектрів для структури ZnO/SiO_2 проведено з використанням багатоосциляторної моделі в діапазоні 50-1500 см⁻¹ за орієнтації електричного поля перпендикулярно до с-осі ($E \perp c$). Методом дисперсійного аналізу визначено оптичні та електричні властивості плівки ZnO, а також силу осциляторів і значення їх коефіцієнта затухання для плівки та підкладки SiO_2 . З'ясовано вплив фононної та плазмон-фононної підсистем плівки ZnO на форму спектра IЧ-відбивання структури $Tb-ZnO/SiO_2$.

Ключові слова: оксид цинку, SiO₂, IЧ-відбивання, тонка плівка, діелектрична підкладка, фонон, плазмон, концентрація електронів.

1. Вступ

Розвиток сучасної опто- та наноелектроніки нерозривно пов'язаний із мініатюризацією окремих функціональних компонентів приладів і пристроїв, що зумовлено технологічними можливостями вирощування тонких полі- та монокристалічних плівок. Очевидно, що властивості таких систем, в першу чергу, будуть визначатися якістю вирощених плівок та можливістю прогнозування їх оптичних та електричних характеристик [1–3].

На даний час дослідженню оптичних та електрофізичних властивостей тонких напівпровідникових плівок на діелектричних та напівпровідникових підкладках присвячено низку наукових праць [4–14], але вплив властивостей плівки та підкладки на характеристики структури плівка-підкладка загалом вивчено недостатньо. Крім того, взаємодія фононних та плазмонних збуджень плівки з фононною підсистемою підкладки може призвести до значних змін у властивостях плівки у порівнянні з монокристалами [3, 5, 6].

Серед багатьох досліджень фізичних властивостей тонких плівок, що стимулюють їх широке використання в різних галузях науки і техніки, значну зацікавленість являє вивчення оптичних та електричних властивостей тонких плівок оксиду цинку, нанесених на діелектричні підкладки [4–12].

Вибір оксиду цинку в ролі досліджуваного об'єкта зумовлений тим, що за своїми фізикохімічними властивостями (оптичні, механічні, п'єзоелектричні і т.д.) він являється одним із найбільш перспективних матеріалів, здатних стати базовим для багатьох інновацій на наступні десятиріччя в області фотоніки і спінтроніки [15]. Крім того, унікальні оптичні властивості монокристалічного ZnO визначають можливість застосування даного матеріалу при розробці нових пристроїв опто- та наноелектроніки [1, 16]. Завдячуючи великій ширині забороненої зони (3,37 еВ при 300 К), оксид цинку набуває широкого використання в ролі матеріалу для короткохвильових джерел світла і може слугувати альтернативою сполук GaN і SiC, собівартість яких на порядки вища [17–19]. Однак, ще більш вагомі перспективи у порівнянні з монокристалами мають плівки ZnO, які використовуються в якості прозорих шарів і в залежності від ступеня легування можуть бути як діелектриками, так і провідниками електричного струму. Як показано у роботах [5, 20–22], питомий опір ρ у

[©] О.В. МЕЛЬНИЧУК, Л.Ю. МЕЛЬНИЧУК, Н.О. КОРСУНСЬКА, Л.Ю. ХОМЕНКОВА,

 $[\]in \Phi$. BEHFEP, 2019

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

тонких плівках ZnO можна змінювати від 10^{-4} до $10^{10}~{\rm Om}\cdot{\rm cm}.$

Проте, слід зазначити, що незважаючи на актуальність даної теми та велику кількість публікацій з досліджень плівок оксиду цинку, в літературі недостатньо даних щодо вивчення взаємодії електромагнітного випромінювання з різними типами коливань (наприклад, фононами, плазмонами). Зазначимо, що взаємодія дипольних коливань із вільними електронами плівки оксиду цинку та дипольними коливаннями підкладки значною мірою змінює характер як об'ємних, так і поверхневих фононних та плазмонфононних збуджень, що призводить до суттєвих змін оптичних властивостей структури в цілому. У зв'язку з цим є зацікавленість у дослідженні оптичних та електрофізичних властивостей плівок ZnO на діелектричних підкладках. Важливим є питання з'ясування взаємодії фононної та плазмон-фононної підсистем плівки з фононною підсистемою підкладки у широкому спектральному ІЧ-діапазоні.

Метою даної роботи було дослідження методом інфрачервоної (IЧ) спектроскопії зовнішнього відбивання за кута падіння світла, близького до нормального, легованих тербієм плівок ZnO, нанесених на SiO₂ підкладку (структури Tb-ZnO/SiO₂) в області плазмон-фононного резонансу ZnO. Відомо, що Tb розглядається як домішка, перспективна для одержання зеленої люмінесценції, а також високої провідності плівок. Проте відносно останнього дані, наведені в літературі, є досить суперечливими [23, 24].

Метод IЧ-спектроскопії являється одним із найінформативніших методів з дослідження оптичних та електрофізичних властивостей тонких плівок, який дає інформацію не лише про фізико-хімічні властивості плівки, а й про параметри підкладки та стан якості обробки її поверхні [5, 12].

Детальний аналіз отримання взаємно узгоджених параметрів одноосцилярної моделі для ZnO проведено у роботах [5, 25]. Авторами [25] показано, що ZnO характеризується значною анізотропією властивостей фононної і слабкою анізотропією плазмової підсистем. Завдяки цьому плівки оксиду цинку є добрими модельними об'єктами, зручними для дослідження оптичних та електрофізичних властивостей в IЧ-області спектра за наявності зв'язку довгохвильових оптичних коливань ґратки, плівки та підкладки з електронною плазмою плівки оксиду цинку.

2. Методика експерименту

Плівки ZnO, леговані тербієм, було нанесено на підкладки SiO₂ методом радіочастотного магнетронного розпилення в плазмі іонів аргону. В ролі мішені було використано мішень оксиду цинку, вкриту каліброваними дискам Tb₄O₇. В ролі підкладок було вибрано пластинки синтетичного оксиду кремнію (типу JGS1) з розмірами $1 \times 1 \times 0.2$ см³, які були поліровані з обох боків. Кристали оксиду кремнію цього типу характеризуються високою чистотою, відсутністю пор та бульбашок. Їм притаманна прозорість в ультрафіолетовій та видимій області спектра, відсутність поглинання в області 175-250 нм та інтенсивне поглинання в області 2600–2800 нм (3550–3850) см⁻¹ завдяки присутності ОН-груп. Температура підкладок була 100 °C, густина потужності мішені – 1,91 ${\rm Bt/cm^2}.$ Товщина шару становила 632 ± 2 нм. Напилені плівки виявилися полікристалічними з орієнтацією с-осі перпендикулярно до поверхні підкладки. Вміст Тb³⁺ становив близько 3 ат.%.

Спектри IЧ відбивання вимірювалися при кімнатній температурі за допомогою Bruker Vertex 70 V FTIR спектрометра при куті падіння світла збудження 13°. В ролі еталона було використано золоте дзеркало. Спектри було записано з роздільною здатністю 1 см⁻¹. Орієнтація електричного поля була вибрана перпендикулярною до *c*-осі підкладки SiO₂. Більш детально процедуру описано в роботах [7, 8].

3. Теорія

Теоретичні розрахунки спектрів ІЧ-відбивання поглинаючої плівки ZnO на "напівнескінченній" підкладці з SiO₂ проведено в області "залишкових променів" плівки та підкладки за математичними виразами [5, 7, 8]:

$$R(\nu) = \{ (q_1^2 + h_1^2) \exp(\gamma_2) + (q_2^2 + h_2^2) \times \\ \times \exp(-\gamma_2) + A\cos\delta_2 + B\sin\delta_2 \} / \\ /\{ \exp(\gamma_2) + (q_1^2 + h_1^2) (q_2^2 + h_2^2) \times \\ \times \exp(-\gamma_2) + C\cos\delta_2 + D\sin\delta_2 \},$$
(1)

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

432

де

$$\begin{split} A &= 2 \left(q_1 q_2 + h_1 h_2 \right), \quad B = 2 \left(q_1 h_2 - q_2 h_1 \right), \\ C &= 2 \left(q_1 q_2 - h_1 h_2 \right), \quad D = 2 \left(q_1 h_2 + q_2 h_1 \right), \\ q_1 &= \frac{n_1^2 - n_2^2 - k_2^2}{\left(n_1 + n_2 \right)^2 + k_2^2}, \quad h_1 = \frac{2n_1 k_2}{\left(n_1 + n_2 \right)^2 + k_2^2}, \\ q_2 &= \frac{n_2^2 - n_3^2 + k_2^2 - k_3^2}{\left(n_2 + n_3 \right)^2 + \left(k_2 + k_3 \right)^2}, \\ h_2 &= \frac{2 \left(n_2 k_3 - n_3 k_2 \right)}{\left(n_2 + n_3 \right)^2 + \left(k_2 + k_3 \right)^2}, \\ \gamma_2 &= \left(4\pi k_2 d \right) / \lambda, \quad \delta_2 = \left(4\pi n_2 d \right) / \lambda \end{split}$$

 $(n_1, n_2, n_3 -$ показники заломлення; $k_1, k_2, k_3 -$ показники поглинання відповідно повітря, плівки ZnO товщиною d_{n_7} та підкладки SiO₂).

Розрахунок n_2 та n_3 проведено на основі моделі діелектричної проникності з адитивним внеском активних оптичних фононів ν_T і плазмонів ν_p плівки та фононів підкладки [9, 18, 19]:

$$\varepsilon_{j}(\nu) = \varepsilon_{1j}(\nu) + i\varepsilon_{2j}(\nu) =$$

$$= \varepsilon_{\infty j} + \frac{\varepsilon_{\infty j}\left(\nu_{Lj}^{2} - \nu_{Tj}^{2}\right)}{\nu_{Tj}^{2} - \nu^{2} - i\nu\gamma_{fj}} - \frac{\nu_{pj}^{2}\varepsilon_{\infty j}}{\nu\left(\nu + i\gamma_{pj}\right)},$$
(2)

де ν_{Tj} , ν_{Lj} – частоти поперечного і поздовжнього оптичних фононів плівки та підкладки; γ_{fj} – коефіцієнт затухання оптичного фонона плівки та підкладки; γ_{pj} і ν_{pj} – коефіцієнт затухання та частота плазмового резонансу плівки ZnO.

При розрахунках спектрів ІЧ-відбивання від поверхні структури ZnO/SiO₂ використано взаємоузгоджені параметри оксиду цинку [25] при $E \perp c$. Що стосується SiO₂, то на підставі даних [26–28], діелектрична проникність характеризується проявом в ІЧ-області 4-х осциляторів. Згідно з роботою [5], для випадку декількох елементарних осциляторів діелектричну проникність підкладки SiO₂ можна записати у вигляді (так звана адитивна модель діелектричної проникності):

$$\varepsilon(\nu) = \varepsilon_1(\nu) + i\varepsilon_2(\nu) =$$
$$= \varepsilon_\infty \left(1 + \sum_{j=1}^N \frac{S_j}{\nu_j^2 - \nu^2 - i\gamma_j \nu} \right), \tag{3}$$

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

де ν_j , γ_j , S_j відповідно частота, коефіцієнт затухання та сила *j*-го осцилятора. Статична діелектрична проникність визначається як $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\infty} +$ $+ \sum_{j=1}^{N} S_j$. Значення сили *j*-го осцилятора $\Delta \varepsilon_j$ та його коефіцієнта затухання γ_{fj} визначено методом Крамерса–Кроніга шляхом дисперсійного аналізу експериментальних і змодельованих спектрів ІЧвідбивання підкладки SiO₂ за відсутності на поверхні плівки ZnO.

Результати та їх обговорення Аналіз теоретичних спектрів ІЧ-відбивання 2.1. Вплив коефіціента

затухання фононів у плівці ZnO

На рис. 1 наведено спектри IЧ-відбивання для плівки ZnO з різними значеннями коефіцієнта затухання фононної підсистеми в структурі ZnO/SiO₂. При розрахунках спектрів IЧвідбивання від поверхні ZnO/SiO₂використано багатоосциляторну математичну модель. Силу *j*-го осцилятора ($\Delta \varepsilon_j$) і значення його коефіцієнта затухання (γ_{fj}) було визначено методом дисперсійного аналізу і подано у таблиці.

Концентрація електронів у плівці ZnO для кривих 1-5 (рис. 1) становить $n_0 = 2,9 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Коефіцієнт затухання фононів γ_f у плівці ZnO змінюється від 10 (крива 1) до 50 см⁻¹ (крива 5) при кроці сканування 10 см⁻¹. Решта параметрів є фіксованими і наведені у підписах до рисунка.

На вставці *а* до рис. 1 подано ділянку спектра від 300 до 550 см⁻¹ у збільшеному масштабі. Як видно з цього рисунка, лише на вказаній ділянці зареєстровано вплив коефіцієнта затухання фононної підсистеми ZnO на спектр IЧ-відбивання. Отримані дані узгоджуються з даними, описаними у роботі [12]. Таким чином, можна стверджувати, що область між частотами поперечного і поздовжнього оптичного фонона плівки ZnO є найчутли-

Параметри підкладки ${\rm SiO}_2$ для розрахунку $R(\nu)$ у структурі ${\rm ZnO}/{\rm SiO}_2$

$ u_{Tj}, \mathrm{cm}^{-1}$	$\Delta \varepsilon_j$	γ_{fj}/ u_{Tj}
457	0,95	0,015
810	0,05	0,1
1072	$0,\!6$	0,006
1160	$0,\!15$	0,04



Рис. 1. Розрахункові спектри $R(\nu)$ плівки ZnO на підкладці SiO₂. Плівка ZnO: $d_{пл} = 632$ нм, $\nu_p = 500$ см⁻¹, $\gamma_p = 2500$ см⁻¹; $\gamma_f = 10$ см⁻¹ (крива 1); $\gamma_f = 20$ см⁻¹ (крива 2); $\gamma_f = 30$ см⁻¹ (крива 3); $\gamma_f = 40$ см⁻¹ (крива 4); $\gamma_f = 50$ см⁻¹ (крива 5)

вішою до зміни коефіцієнта затухання фононної підсистеми.

4.2.2. Вплив товщини плівки ZnO на спектри IЧ-відбивання

Залежність $R(\nu)$ структури ZnO/SiO₂ від товщини плівки оксиду цинку подано на рис. 2. Товщину плівки змінювали в межах $d_{\rm пл} = 50$; 200; 400; 600; 800 нм (відповідно криві 1-5). Інші параметри вибиралися такими: $\nu_p = 500 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_p = 2500 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_f = 30 \text{ см}^{-1}$.

Як видно з рисунка, збільшення товщини шару ZnO до 800 нм при незмінних параметрах фононної та плазмової підсистем призводить до значної деформації спектра $R(\nu)$ в області 200–400 та 1000–1500 см⁻¹. Це зумовлено взаємодією фононної та плазмонної підсистем плівки ZnO з фононною підсистемою підкладки SiO₂. На частоті 475 см⁻¹ спостерігається максимум $R(\nu) = 0.85$, який фіксований для всіх товщин плівок оксиду цинку. Максимальна чутливість коефіцієнта відбивання $R(\nu)$ до збільшення товщини плівки спостерігається у високочастотній області спектра. У діапазоні від 1100 до 1300 см⁻¹ зареєстровано збільшення коефіцієнта відбивання на 40%.

4.2.3. Вплив частоти плазмон-фононного резонансу ZnO на спектри IЧ відбивання

На рис. 3 показано залежність форми спектрів ІЧвідбивання від частоти плазмон-фононного резонансу в плівках ZnO товщиною 632 нм. Криві 1– 5 розраховані при $\gamma_{p\perp} = \nu_{p\perp}$, які знаходяться у проміжку від 1 до 1000 см⁻¹, що відповідає зміні концентрації від 10¹⁶ до 10¹⁹ см⁻³, рухливості від 10 до 200 см²/(В·с) та провідності від 100 до 410 Ом⁻¹· см⁻¹. Із рисунка видно, що у спектрах відбивання $R(\nu)$ найбільш суттєві зміни спостерігаються в області 50–300 та 520–1050 см⁻¹, де $R(\nu)$ збільшується від 0,05 до 0,25, та в діапазоні 1200– 1500 см⁻¹, де $R(\nu)$ зменшується від 0,7 до 0,03.

Характерною особливістю всіх спектрів на рис. 1–3 є наявність максимумів у діапазонах 400– 600 та 1100–1300 см⁻¹, зумовлених впливом фононної та плазмонної підсистем в області "залишкових променів" ZnO та фононної підсистеми SiO₂. Збільшення концентрації носіїв зарядів у плівках оксиду цинку від 10¹⁶ до 10¹⁹ см⁻³ призводить до істотного деформування спектра відбивання в широкому спектральному IЧ-діапазоні.

Слід зазначити, що існує кореляція форми спектра IЧ-відбивання з частотами поперечних і поздовжніх оптичних фононів. Область "залишкових променів" плівки ZnO знаходиться в діапазоні 400– 600 см⁻¹, область "залишкових променів" підкладки SiO₂ – в діапазоні 350–1500 см⁻¹. Частоти точок перегину низькочастотного схилу смуг відбивання плівки та підкладки близькі до частоти поперечного оптичного фонона, а високочастотного схилу – до частоти поздовжніх оптичних фононів. Виявлено, що при моделюванні $R(\nu)$ в обла-

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5



Рис. 2. Розрахункові спектри $R(\nu)$ плівки ZnO на підкладці SiO₂. Плівка ZnO: $\nu_p = 500 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_p = 2500 \text{ см}^{-1}$, $\gamma_f = 30 \text{ см}^{-1}$. Товщина плівки $d_{\text{пл}} = 50$; 200; 400; 600; 800 нм (відповідно криві 1–5)



Рис. 3. Розрахункові спектри $R(\nu)$ плівки ZnO на підкладці SiO₂. Плівка ZnO: $\nu_p = \gamma_p = 1$; 250; 500; 750; 1000 см⁻¹(криві 1–5), $\gamma_f = 30$ см⁻¹. Товщина плівки $d_{nn} = 632$ нм

сті "залишкових променів" за допомогою співвідношень Крамерса-Кроніга найбільші зміни діелектричної проникності $\varepsilon(\nu)$ спостерігаються в області плазмон-фононного резонансу плівки оксиду цинку. Зміна частоти поперечного оптичного фонона плівки ZnO незначною мірою зсуває відповідний схил смуги відбивання і мало змінює спектр $R(\nu)$ у високочастотній області спектра.

4.2.4. Порівняння теоретичних та експериментальних даних

Експериментальні спектри також демонстрували наявність максимумів у діапазонах 400–600 та

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

1100–1300 см⁻¹. Проте у вказаних проміжках спостерігалося зменшення $R(\nu)$ у порівнянні з даними теоретичних розрахунків. Враховуючи те, що плівка ZnO була легованою тербієм, зміну форми спектра IЧ-відбивання можна пояснити легуванням. Це пов'язане не лише з концентрацією електронів, а також з їх рухливістю.

На рис. 4 подано експериментальний спектр IЧвідбивання для легованої плівки ZnO у структурі ZnO/SiO₂ (крива 1) та змодельований (крива 2). Останній отримано для товщини плівки, яка становила 632 нм. Параметри підкладки вибиралися з таблиці. Концентрація вільних електронів у плівці



Рис. 4. Експериментальні (точки 1) та розрахункові (лінія 2) спектри $R(\nu)$ плівки ZnO на підкладці SiO₂. Плівка ZnO: $d_{\rm пл} = 632$ нм, $\nu_p = 500$ см⁻¹, $\gamma_p = 2500$ см⁻¹, $\gamma_f = 30$ см⁻¹

ZnO варіювалась від $n_0 = 10^{16}$ до 10^{19} см⁻³. Невідомими параметрами для плівки ZnO вважались ν_p, γ_p і γ_f .

Порівняння розрахункових кривих $R(\nu)$ з експериментальними проводились за методом найменпих квадратів, також визначалось і середньоквадратичне відхилення значень експериментального коефіцієнта відбивання від розрахункового за методикою, описаною в монографіях [5, 13]. Точність збігу теоретичного спектра відбивання з експериментальним у проміжку 50–1500 см⁻¹ становить $\delta = 10^{-2}$.

Як видно з рис. 4, найкраще узгодження теорії з експериментом спостерігається при частоті і коефіцієнті затухання плазмонів і фононів, відповідно, $\nu_p = 500$ і $\gamma_p = 2500$ см⁻¹, а також $\gamma_f = 30$ см⁻¹. Похибка не перевищує 3%. На основі одержаних даних було визначено концентрацію електронів $n_0 = 2,9 \cdot 10^{18}$ см⁻³ та їх рухливість $\mu = 90$ см²/(В·с). Ця концентрація значно менша від концентрації Tb³⁺, тобто зростання провідності внаслідок легування не спостерігається. Це може бути пов'язано з тим, що вбудовування тербію в ґратку ZnO призводить до утворення компенсуючого акцепторного дефекту ґратки [29, 30].

Зазначимо, що вимірювання провідності на постійному струмі показало, що електропровідність плівки становить ${\sim}10^{-7}~{\rm Om}^{-1}\,{\rm cm}^{-1}$. Ці значення набагато нижчі, ніж ті, що одержані з ІЧ-спектрів відбивання, що свідчить про наявність у плівці послідовно включених високоомних областей. Достатньо добре узгодження $R(\nu)$ в області "залишкових променів" плівки та підкладки на рис. 4 підтверджує достовірність одержаних авторами [25] взаємно узгоджених об'ємних параметрів для оксиду цинку та можливість їх використання при вивченні текстурованих полікристалічних плівок ZnO. Зазначимо, що зміна положення легованих плівок оксиду цинку на підкладках SiO₂ в площині xy практично не змінює форми спектра $R(\nu)$, що свідчить про ізотропність оптичних та електрофізичних властивостей досліджуваної системи. Крім того, можна стверджувати, що оптична вісь текстурованих шарів оксиду цинку та SiO₂ перпендикулярна до площини xy ($c \perp xy$).

5. Висновки

Таким чином, із проведених в даній роботі комплексних досліджень випливає, що спектри IЧ-відбивання у структурі повітря–плівка ZnO–підкладка SiO₂ добре моделюються при використанні об'ємних взаємоузгоджених параметрів, отриманих у роботах [5, 25] для монокристалів оксиду цинку при $E \perp c$ та використанні багатоосциляторної математичної моделі з параметрами фононної підсистеми, взятими з роботи [26]. Співставлення оптичних констант монокристалів ZnO з плівками оксиду цинку дозволяє зробити висновок про те, що досліджувані плівки були доброї якості, тому коефіцієнти затухання фононної та плазмонної підсистем практично однакові. Це свідчить про те, що метод IЧ-спектроскопії зов-

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

нішнього відбивання є зручним та інформативним при визначенні ґраткових та електрофізичних властивостей плівок ZnO. З використанням цього неруйнівного методу визначено концентрацію носіїв заряду та їх рухливість в структурах Tb– ZnO/SiO₂.

Робота виконувалась у рамках теми № 89452 "Вплив легування на структурні, оптичні та електрон-фононні властивості та стабільність анізотропних кристалів" при фінансовій підтримці Міністерства освіти і науки України.

- C. Jagadish, S. Pearton. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures. Processing, Properties and Applications (Elsevier, 2006).
- Н.О. Корсунська, І.В. Маркевич, Л.В. Борковська, Л.Ю. Хоменкова, Л.Ю. Мельничук, О.В. Мельничук, Є.Ф. Венгер. Структурні, оптичні та електронфононні властивості легованих широкозонних оксидів (НДУ ім. М. Гоголя, 2018).
- І.В. Маркевич, Л.В. Борковська, Є.Ф. Венгер, Н.О. Корсунська, В.І. Кушніренко, О.В. Мельничук, Л.Ю. Мельничук, Л.Ю. Хоменкова. Електричні, оптичні та люмінесцентні властивості монокристалів оксиду цинку (Авторський огляд). УФЖ 13 (1), 57 (2018).
- А.В. Раков. Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур (Сов. радио, 1975).
- 5. Є.Ф. Венгер, О.В. Мельничук, Ю.А. Пасічник. *Спе*ктроскопія залишкових променів (Наук. думка, 2001).
- Е.А. Виноградов, И.А. Дорофеев. Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел (Физматлит, 2010).
- O. Melnichuk, L. Melnichuk, B. Tsykaniuk, Z. Tsybrii, P. Lytvyn, C. Guillaume, X. Portier, V. Strelchuk, Ye. Venger, L. Khomenkova, N. Korsunska. Investigation of undoped and Tb-doped ZnO films on Al₂O₃ substrate by infrared reflection method. *Thin Solid Films* 673, 136 (2019).
- N. Korsunska, L. Borkovska, Yu. Polischuk, O. Kolomys, P. Lytvyn, I. Markevich, V. Strelchuk, V. Kladko, O. Melnichuk, L. Melnichuk, L. Khomenkova, C. Guillaume, X. Portier. Photoluminescence, conductivity and structural study of terbium doped ZnO films grown on different substrates. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 94, 51 (2019).
- О.В. Мельничук. Дослідження тонких плівок ZnO на поверхні SiC 6H методом ІЧ-спектроскопії. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника 33, 146 (1998).
- A.V. Melnichuk. Optical and electrophysical properties of thin doped ZnO/SiC 6H films from the IR reflection spectra. Ukr. Fiz. Zh. 43, 1310 (1998).

ISSN 0372-400Х. Укр. фіз. журн. 2019. Т. 64, № 5

- E.F. Venger, L.Yu. Melnichuk, O.V. Melnichuk, T.V. Shovkoplyas. Guided-wave polaritons in ZnO/6H-SiC structures. In Proceedings of 16th International Conference on Spectroscopy of Molecules and Crystals, Kyiv (2003), p. 126.
- E.F. Venger, A.V. Melnichuk, Ju.A. Pasechnik, E.I. Sukhenko. IR spectroscopy studies of the zinc oxide on sapphire structure. Ukr. Fiz. Zh. 42, 1357 (1997).
- Ю.И. Уханов. Оптические свойства полупроводников (Наука, 1977).
- 14. Є.Ф. Венгер, Л.Ю. Мельничук, О.В. Мельничук, Т.В. Семікіна. Дослідження методами ІЧ-спектроскопії тонких плівок оксиду цинку вирощених методом АПО. УФЖ 61 (12), 1059 (2016).
- Ü. Özgür, Ya. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.-J. Cho, H. Morkoç. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.* 98, 041301 (2005).
- Z.L. Wang. Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. J. Phys.: Condens. Matter 16, R829 (2004).
- 17. К.В. Шалимова. *Физика полупроводников* (Энергоатомиздат, 1985).
- X. Gu, M.A. Reshchikov, A. Teke, D. Johnstone, H. Morkoç. GaN epitaxy on thermally treated c-plane bulk ZnO substrates with O and Zn faces. *Appl. Phys. Lett.* 84, 2268 (2004).
- F. Hamdani. Microstructure and optical properties of epitaxial GaN on ZnO (0001) grown by reactive molecular beam epitaxy. J. Appl. Phys. 83, 983 (1998).
- T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand. Zener model description of ferromagnetism in zincblende magnetic semiconductors. *Science* 287 (5455), 1019 (2000).
- 21. S.J. Pearton, C.R. Abernathy, G.T. Thaler, R.M. Frazier, D.P. Norton, F. Ren, Y.D. Park, J.M. Zavada, I.A. Buyanova, W.M. Chen. Wide bandgap GaN-based semiconductors for spintronics. J. Phys.: Condens. Matter 16, R209 (2004).
- S.J. Pearton, W.H. Heo, M. Ivill, D.P. Norton, T. Steiner. Dilute magnetic semiconducting oxides. *Semicond. Sci. Technol.* 19, R59 (2004).
- 23. Z.B. Fang, Y.S Tan, H.X. Gong, C.M. Zhen, Z.W. He, Y.Y. Wang. Transparent conductive Tb-doped ZnO films prepared by rf reactive magnetron sputtering. *Mater. Lett.* 59, 2611 (2005).
- 24. A. Elfakir, A. Douayar, R. Diaz, I. Chaki, P. Prieto, M. Loghmarti, A. Belayachi, M. Abd-Lefdil. Elaboration and characterization of sprayed Tb-doped ZnO thin films. *Sensors Transduc.* 27, 161 (2014).
- 25. E.F. Venger, A.V. Melnichuk, L.Ju. Melnichuk, Ju.A. Pasechnik. Anisotropy of the ZnO single crystal reflectivity

in the region of residual rays. *Phys. Status Solidi B* **188**, 823 (1995).

- C.T. Kirk. Quantitative analysis of the effect of disorderinduced mode coupling on infrared absorption in silica. *Phys. Rev. B* 38, 1255 (1988).
- F. Pechar. Infrared reflection spectra of selected modifications of SiO₂ and Al₂O₃. Cryst. Res. Technol. 20, 239 (1985).
- S.D. Ross. Inorganic Infrared and Raman Spectra (McGraw-Hill, 1972).
- H.J. Lozykowski. Kinetics of luminescence of isoelectronic rare-earth ions in III-V semiconductors. *Phys. Rev. B* 48, 17758 (1993).
- P.P. Pal, J. Manam. Effect of Li+ co-doping on the luminescence properties of ZnO:Tb³⁺ nanophosphors. *Nanosyst. Phys. Chem. Math.* 4, 395 (2013).

Одержано 20.03.19

O.V. Melnichuk, L.Yu. Melnichuk, N.O. Korsunska, L.Yu. Khomenkova, Ye.F. Venger OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Tb–ZnO/SiO₂ STRUCTURE IN THE INFRARED SPECTRAL INTERVAL

Summary

Optical and electrophysical properties of terbium-doped zinc oxide films have been studied, by using the external reflection IR spectroscopy. The films were deposited onto silicon oxide substrates with the help of the magnetron sputtering method. A theoretical analysis of the reflection spectra of the ZnO/SiO₂ structure is carried out in the framework of a multioscillatory model in the spectral interval 50–1500 cm⁻¹ and for the electrical field orientation perpendicular to the *c*-axis $(E \perp c)$. The method of dispersion analysis is applied to determine the optical and electrical properties of ZnO films, as well as the oscillator strengths and damping coefficients in the ZnO film and the SiO₂ substrate. The influences of the phonon and plasmon-phonon subsystems in the ZnO film on the shape of IR reflection spectra registered from the Tb–ZnO/SiO₂ structure are elucidated.