

В.А. ВИНІЧЕНКО, В.В. БУЧЕНКО, Н.С. ГОЛОВОРІДЬКО, В.В. ЛЕНДЕЛ,
О.Є. ЛУШКІН, В.М. ТЕЛЕГА

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
(Вул. Володимирська, 64/13, Київ 01601; e-mail: vbuchenko@yandex.ua)

ОПТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ 95% In_2O_3 + 5% SnO_2 /ns-Si

УДК 538.958

У роботі розглянуто оптичні та електрофізичні властивості гетероструктур 95% In_2O_3 + 5% SnO_2 /ns-Si з товщиною плівок 6 та 12 нм, що наносились методом магнетронного розпилення на структуровану поверхню кремнію. Показано, що для плівки товщиною 6 нм характерна наявність декількох піків оптичного поглинання, тоді як у структурі з товщиною 12 нм в тому ж спектральному діапазоні ці максимуми відсутні. Визначено вплив газового середовища та оптичного випромінювання на електрофізичні властивості структур 95% In_2O_3 + 5% SnO_2 /ns-Si та показано, що відгук досліджуваних структур на газове середовище пов'язаний з діелектричною проникністю адсорбату. Результати даного дослідження можна застосовувати при розробці резистивних газових сенсорів на основі плівок 95% In_2O_3 + 5% SnO_2 /ns-Si.

Ключові слова: вольт-амперні характеристики, спектр поглинання, тонкі плівки, прозорі оксиди.

1. Вступ

Оксиди металів завдяки своїм електрофізичним властивостям мають широке застосування в сучасній електроніці, зокрема, для виготовлення сонячних елементів та прозорих електродів для них, електролюмінесцентних світлодіодів та газових сенсорів [1–7]. Оксиди металів, які застосовують в електроніці, є широкозонними напівпровідниками. Найпоширенішими серед такого типу матеріалів є SnO_2 та In_2O_3 [8–10]. Ці матеріали, зокрема, набули популярності і у виготовленні плівкових газових сенсорів [2, 10–13].

Важливими параметрами в роботі приладів, побудованих на основі плівок оксидів індію та олова, є їх електричні та оптичні характеристики такі, як провідність [10] та спектр оптичного поглинання [12]. На ці параметри можуть впливати різні чинники, як зовнішні, так і внутрішні. Так, для керування провідністю плівок оксидів в них часто додають різні домішки. Наприклад, для керування провідністю та чутливістю сенсорної плівки SnO_2 в газових сенсорах її легують такими речовинами,

як In_2O_3 , Fe_2O_3 , Sb, ZrO_2 , SiO_2 [13]. Це дозволяє зменшити робочу температуру сенсора та підвищити його селективність. Варто зазначити, що при вивченні електрофізичних властивостей структур на основі оксидів металів, зокрема вольт-амперних характеристик (ВАХ), часто досліджують область зворотних струмів, оскільки при невеликих значеннях струму вплив зовнішніх чинників проявляється краще [14–16].

Серед композитів оксидів металів широкого застосування набув композит оксиду індію та олова – ІТО [1, 17]. При цьому, варіюючи відсотковий склад композита, можна змінювати його електрофізичні властивості. Так, автори роботи [1] показали, що плівки ІТО в складі 90% In_2O_3 + 10% SnO_2 мають найбільшу провідність та сильно поглинають в інфрачервоній області спектра, порівняно з іншим можливим їх складом.

З іншого боку, на провідність таких плівок впливає концентрація поверхневих станів [2]. В роботі [18] показано, що при нанесенні плівки SnO_2 на підкладку з поруватого кремнію поверхневі стани з енергією порядку 2 еВ відносно вершини валентної зони викликають електролюмінесценцію таких структур у видимій області спектра. Автори роботи [19] показали, що використання підкладки

© В.А. ВИНІЧЕНКО, В.В. БУЧЕНКО,
Н.С. ГОЛОВОРІДЬКО, В.В. ЛЕНДЕЛ,
О.Є. ЛУШКІН, В.М. ТЕЛЕГА, 2016

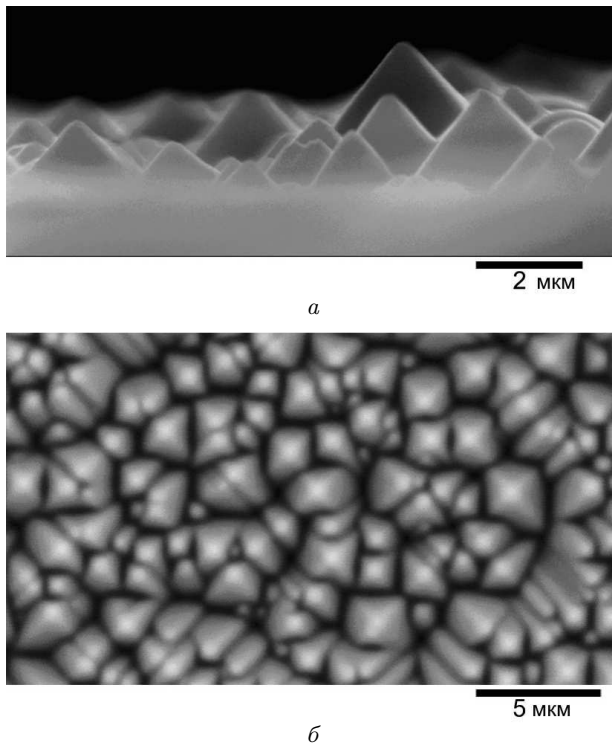


Рис. 1. РЕМ-зображення текстурованої поверхні кремнію

з поруватого кремнію дозволяє значно підвищити чутливість сенсора на плівці SnO_2 за кімнатної температури.

У роботах [12, 14] показано, що опромінення поруватого SiO_2 підвищує його провідність. При цьому, вплив світла на електрофізичні властивості гетероструктур, що складаються з плівок ІТО, нанесених на підкладку з поруватого кремнію, досліджений недостатньо. Виходячи з оптичних властивостей плівок ІТО [1], опромінення світлом може підвищити провідність гетероструктур на їх основі. Метою даної роботи було дослідити вплив навколишнього середовища та товщини плівки ІТО на оптичні та електрофізичні властивості гетероструктур $95\% \text{In}_2\text{O}_3 + 5\% \text{SnO}_2/\text{ns-Si}$.

2. Методика експерименту

2.1. Експериментальні зразки

Плівки ІТО в співвідношенні $95\% \text{In}_2\text{O}_3 + 5\% \text{SnO}_2$ наносились на пластини кремнію p -типу марки КДБ-7,5 орієнтації (100) товщиною 200 мкм. Пе-

ред нанесенням плівок ІТО поверхня кремнію піддавалась текстуруванню:

- Наноструктурування поверхні кремнію методом хімічного травлення 2%-ного водного розчину KOH в 4%-ному водному розчині ізопропилового спирту при температурі 75°C протягом 10 хвилин.
- Травлення в $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ у співвідношенні 1:1:5 при 90°C протягом 10 хвилин (щоб побутися луку KOH); промивка в деіонізованій воді; травлення в 1%-ному розчині плавикової кислоти HF 30–40 секунд; промивка в деіонізованій воді; кип'ятіння в перекисно-аміачному розчині $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ у співвідношенні 1:1:5 при 90°C протягом 10 хвилин; обробка в 1%-ному розчині плавикової кислоти HF 30–40 секунд з подальшою промивкою в деіонізованій воді.
- Окислення при 1000°C у дифузійній печі СДОМ-3М у сухій (15 хв.), вологій (45 хв.) і знову в сухій атмосфері.

- Захист фоторезистом однієї сторони.
- Травлення в буферному травнику $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ у співвідношенні 1:1:20 при 90°C протягом 10 хв.
- Зняття фоторезисту, відмивка в деіонізованій воді з наступною операцією дифузії бору з твердого джерела при температурі 920°C протягом 40 хв. (загонка) та при 1050°C протягом 2 годин (розгонка).
- Травлення скла і оксиду в 5%-ному розчині HF .
- Напилення плівки алюмінію товщиною 500 нм при 125°C на установці вакуумного напорошення "Катод-1М".

- Для формування омичних контактів при 510°C в протоці азоту в дифузійній печі протягом 15 хв. проводиться відпал.

- Після цього проводиться напилення шару Ti-Mo-Ag товщиною до 500 нм.

На рис. 1 наведено зображення поверхні кремнієвої підкладки. Як видно з рисунка, зразки мають не гладку поверхню, а дещо текстуровану. Висота пірамідок такої поверхні 1–5 мкм. При формуванні наноструктурованого кремнію на підкладках монокристалічного кремнію відбувається зміна не тільки структурних властивостей, що призводить до зміни ширини забороненої зони і прояву квантоворозмірних ефектів [20], а й утворення на поверхні нових сполук кремнію з підвищеним вмістом водню й аморфного кремнію [21]. Така складна стру-

ктура зумовлює прояв нових властивостей, пов'язаних з розсіюванням світла на неоднорідностях середовища [22, 23].

Контакти із срібла до плівок ІТО напорошувалися на цій же установці (ВУП-5) методом термічного випаровування із молібденової лодочки товщиною 500 нм через магнітну маску.

Напилення плівок ІТО проводилося на модернізованій установці вакуумного напорошення ВУП-5 методом магнетронного реактивного розпорошення на постійному струмі металічної мішені із сплаву ІпО-5 (5 мас.% олова, а решта – індій) в розряді суміші газів із об'ємними долями 2/3 аргону та 1/3 кисню. Перед напорошенням підкладки оброблялись в 5%-ному розчині HF протягом 30 с. Камера установки попередньо відкачувалася до вакууму $2-3 \cdot 10^{-5}$ Тор. Потім в камеру напускалася газова суміш до тиску $7 \cdot 10^{-3}$ Тор, відстань від мішені до підкладки була 45 мм, струм розряду становив 200 мА, товщина плівки дорівнювала 6 та 12 нм.

2.2. Блок вимірювання поглинання

Блок-схема експериментальної установки спектрального еліпсометра наведена на рис. 2 [24]. Як джерело світла використовувалася галогенна лампа розжарювання. В установці використано монохроматор ДМР-4 із змінною скляною та кварцовою оптикою. Зразки встановлювалися на гоніометрі, на якому закріплений аналізатор та фотоелектронний підсилювач (ФЕП). Для реєстрації сигналу використовувався ФЕП ФЕУ-100. Після ФЕП сигнал підсилювався за допомогою підсилювача змінного струму, потім, після детектування, синхронним детектором та реєструвався цифровим вольтметром В7-21.

Похибка значень оптичних констант визначається точністю лімбів, за якими ведеться відлік кута падіння та азимутів поляризатора і аналізатора та похибкою вимірювання величини інтенсивностей. Відносна похибка визначення еліпсометричних параметрів [25]:

$$\tan \psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (1)$$

де R_p і R_s – амплітудні коефіцієнти відбиття Френеля, а похибка вимірювань еліпсометричних параметрів становила $\delta\psi/\psi \approx 1\%$ та $\delta\Delta/\Delta \approx 1,5\%$.

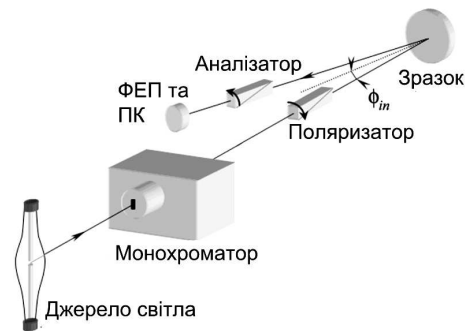


Рис. 2. Блок-схема установки для спектро-еліпсометричних досліджень

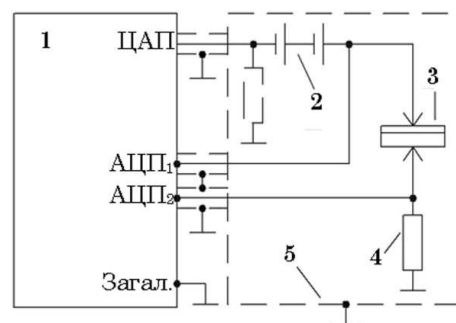


Рис. 3. Схема пристрою для вимірювання ВАХ експериментальних зразків

Вимірювання спектральних залежностей відбувалось на повітрі при кімнатній температурі.

2.3. Блок вимірювання вольт-амперних характеристик

Для вимірювання вольт-амперних характеристик і спостереження їх змін під дією різних газових середовищ застосовувався саморобний пристрій (рис. 3) на основі інтерфейсної плати 1 із високошвидкісними (час перетворення 8 мкс) 12-бітовими аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) і генератором розгортки, роль якого виконував один із каналів 12-бітового цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) із подвійною буферизацією (час встановлення 30 мкс). Канал ЦАП був послідовно з'єднаний із гальванічним джерелом опорної напруги 2. Результуюча напруга, яка підводилася до зразка 3, також подавалася на перший канал АЦП, а напруга, що пропорційна струму на вимірювальному опорі 5, подавалася на другий канал АЦП плати. Вимірювання могли проводитись як у темряві, так і при світлі у металевому боксі 4, який

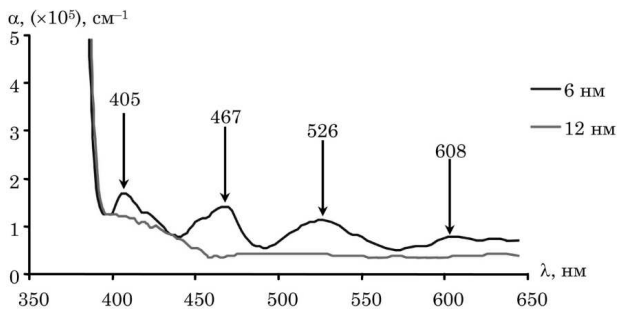


Рис. 4. Спектральні залежності коефіцієнта поглинання (α) для плівок 95% In_2O_3 + 5% SnO_2 різної товщини

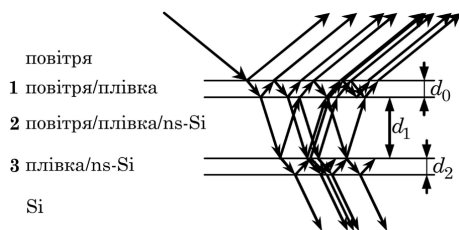


Рис. 5. Схематичні зображення відбиття світла від багатошарової структури

слугував екраном, що зменшував вплив зовнішніх наводок на вимірювальне коло.

Дослідження впливу газового середовища проводилось окремо в насичених парах етилового та ізопропилового спиртів, а також в лабораторній атмосфері. Час експозиції в досліджуваному газовому середовищі дорівнював 20 хв. Перед зміною газового середовища бокс щоразу провітрювався протягом 20 хв. Під час процедур витримки та провітрювання зразків джерело живлення від'єднувалося від них.

Таблиця 1. Структура і склад досліджуваних плівок

Шар (рис. 5)	Плівка 6 нм		Плівка 12 нм	
	Склад, %	Товщина, нм	Склад, %	Товщина, нм
1 повітря плівка	99,8 0,2	3	99,1 0,9	11
2 повітря плівка ns-Si	53,1 2,2 44,7		2005	
3 плівка ns-Si	1,6 98,4	7	1,4 98,6	13

3. Результати та їх обговорення

3.1. Оптичні властивості плівок

Виміряні спектральні залежності коефіцієнта поглинання $\alpha = 2\pi/\lambda$ плівок ІТО наведені на рис. 4. Характерною особливістю залежності зміни коефіцієнта поглинання плівки є наявність декількох максимумів поглинання (405, 467, 526 та 608 нм) для плівки товщиною 6 нм. Потрібно зазначити, що такі максимуми поглинання відсутні для плівки товщиною 12 нм (спектр поглинання даної плівки характеризується сталим коефіцієнтом поглинання в області 469–650 нм). Вказані максимуми поглинання можуть виникати за рахунок появи дефектів у перехідному шарі між плівкою ІТО та текстурованим кремнієм. Однак, для того, щоб з'ясувати, чому такі особливості не проявляються в спектрі поглинання гетероструктури з товщиною плівки ІТО 12 нм доцільно провести додаткові дослідження.

Особливості оптичних властивостей плівок за наявності вкраплень інших матеріалів неодноразово обговорювалися в літературі [26–28]. При інтерпретації результатів оптичних вимірювань, які отримані при відбитті або пропусканні поляризованого світла багатошаровими структурами (рис. 5) [24], важливо правильно вибрати модель, що адекватно описує процес взаємодії з таким багатошаровим середовищем.

Враховуючи сказане вище було вибрано модель, що містить набір чистих шарів та перехідні шари, показник заломлення яких може бути описано моделлю ефективного середовища. Відповідно до такого наближення комплексний показник заломлення перехідного шару буде визначатись таким виразом:

$$\sum_m f_m \frac{N_m - N}{N_m + 2N} = 0, \quad \sum_m f_m = 1, \quad (2)$$

де $N_m = n_m + j\kappa_m$ – комплексний показник заломлення m -ї компоненти, f_m – її об'ємна доля (концентрація), $N = n + j\kappa$ – ефективний комплексний показник заломлення. Для моделювання впливу перехідних шарів на сумарний коефіцієнт відбиття використано кутові залежності еліпсометричних параметрів.

У табл. 1 наведені результати моделювання параметрів даних структур та впливу інтерфейсів. З

таблиці видно, що плівка товщиною 6 нм є неоднорідною по товщині. Така неоднорідність разом з більшою площею поверхні можуть надавати їй нові властивості, пов'язані з поверхневими ефектами, оскільки товщина шарів гетеропереходу буде різною в різних областях поверхні. Відзначимо також, що плівка, товщиною 12 нм, є значно одноріднішою.

3.2. ВАХ експериментальних зразків

3.2.1. Вплив оточуючого газового середовища

На рис. 6 зображено серію зворотних гілок ВАХ для зразків з товщиною плівки ІТО 6 нм та 12 нм при зміні оточуючого газового середовища. З наведених залежностей видно, що ВАХ в атмосфері насиченої пари спиртів досить добре розрізняються.

Загалом, в порівнянні з попередніми дослідженнями зразків, які не мали такої розвиненої поверхні [29] і зворотні струми в яких не перевищували 200 мкА, дані зразки з текстурованою поверхнею мають в кілька разів більші струми при тих самих напругах. Це, в свою чергу, підтверджує припущення щодо можливості їх використання як сенсорних структур, а збільшення відгуку можна пояснити збільшенням ефективної площі поверхні робочої плівки.

Порядок розташування отриманих залежностей відповідає значенню діелектричної проникності (табл. 2) даних речовин, що свідчить про вплив діелектричної проникності адсорбату на реакцію структури [31] на газове середовище.

Дані експериментальні зразки є складними гетероструктурами, в яких надтонкий шар широкозонного напівпровідника знаходиться між металевим контактом та кремнієм *p*-типу. Однак, з огляду на невелику товщину плівки ІТО (6 та 12 нм), зона просторового заряду займає всю плівку по товщині. Це збільшує падіння потенціалу на плівці ІТО, а отже, знижує потенціальний бар'єр контакту метал-кремній. Адсорбція газів з певною діелектричною проникністю, за рахунок невеликої товщини шару ІТО, приводить до зміни діелектричної проникності приповерхневого шару [32]. Це, в свою чергу, призводить до подальшого падіння потенціального бар'єра метал-напівпровідник. При цьому, чим більше значення діелектричної проникності адсорбату, тим меншим стає потенціальний

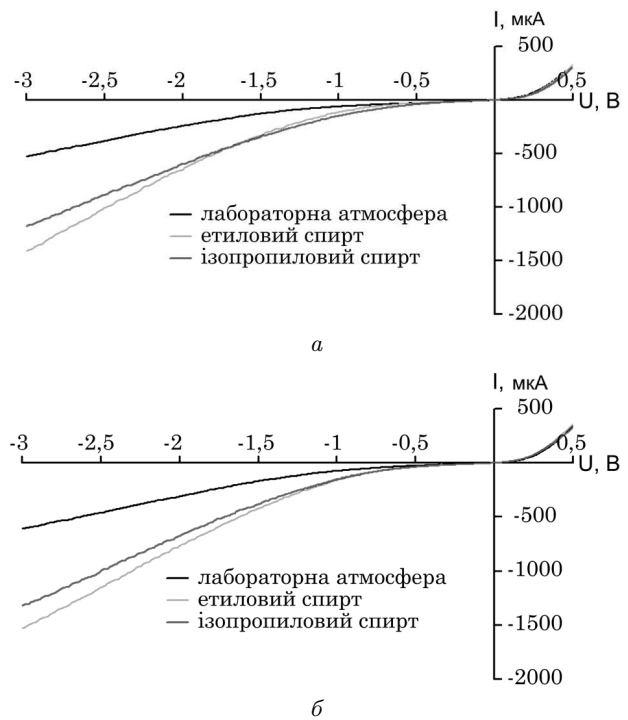


Рис. 6. Серія ВАХ для зразків з товщиною плівки 6 (а) та 12 (б) нм при зміні оточуючого газового середовища

бар'єр. На вигляд ВАХ даних структур можуть впливати також і дефекти в перехідному шарі між кремнієм та ІТО [33].

З рис. 6 видно, що хід ВАХ для зразків з різною товщиною плівок ІТО майже однаковий. Однак, струм при зворотній напрузі $-2,5$ В для структури з товщиною плівки 12 нм є трохи вищим за відповідний струм зразка 6 нм (табл. 3). Таким чином, з точки зору максимальної чутливості до складу оточуючого газового середовища більш прийнятною є структура з товщиною шару ІТО 12 нм.

Зазначимо, що з метою кращого розрізнення складу навколишнього газового середовища аналіз ВАХ даних структур потрібно проводити у всьо-

Таблиця 2. Діелектрична проникність (ϵ) деяких речовин [30]

Атмосфера	Формула	ϵ
Лабораторна атмосфера (повітря)	$O_2 + N_2$	1
Ізопропиловий спирт	C_3H_7OH	18,3
Етиловий спирт	C_2H_5OH	27

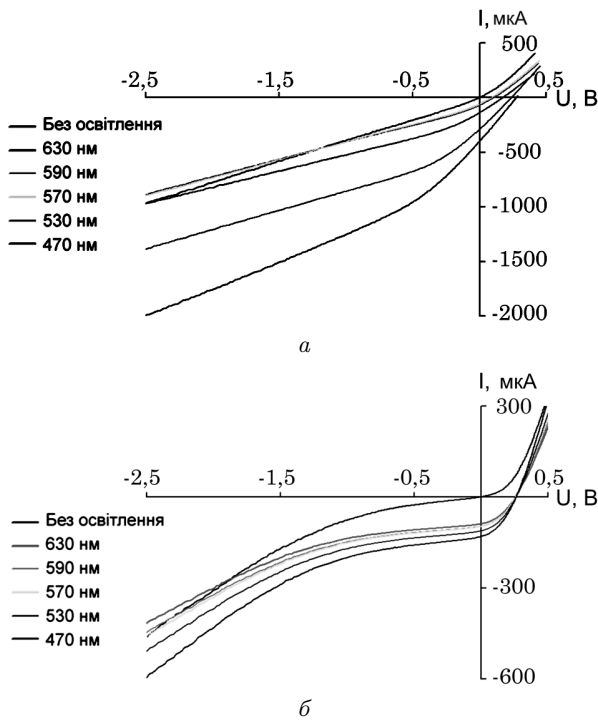


Рис. 7. Зміна ВАХ зразка товщиною 6 нм (а) та 12 нм (б) від довжини хвилі освітлення в лабораторній атмосфері

му діапазоні вимірювання ВАХ. Такий аналіз дозволяють зробити статистичні методи аналізу інтегральних змін [34–36].

3.2.2. Вплив освітлення

Впливу оптичного випромінювання на процеси адсорбції та ефективності каталітичних реакцій на поверхні напівпровідникових оксидів присвячено багато робіт [2, 4, 6]. Зазначимо, що у приповерхневому шарі поглинається близько 0,001 інтенсивності випромінювання, але і ця частина може давати внесок у процеси адсорбції і десорбції. Крім того, можлива взаємодія випромінювання з молекулами в газовій фазі з їх дисоціацією і зміною адсорбцій-

Таблиця 3. Значення струму при напрузі –2,5 В

Атмосфера	Плівка 6 нм <i>I</i> , мкА	Плівка 12 нм <i>I</i> , мкА
Лабораторна атмосфера	–382	–460
Ізопропиловий спирт	–886	–991
Етиловий спирт	–1023	–1145

ної здатності. Автори роботи [37, 38] провели експерименти по впливу випромінювання світлодіодів на чутливість газових сенсорів на основі плівок SnO₂, отриманих реактивним магнетронним напыленням на підкладки шорсткого кварцу. Вони вивчали зміну чутливості зразків при їх опроміненні червоним, жовтим та синім світлодіодами до пари етилового, ізопропилового спиртів, ацетону, бензолу. Фактично вперше вони показали, що усі види випромінювання для усіх перерахованих реагентів збільшують чутливість сенсорів при дозах реагентів 1–10 ppm (2–100 у випадку низької чутливості сенсорів без опромінення).

Для визначення відгуку структур на оптичне опромінення використовувались світлодіоди (LED) з такими довжинами хвиль: 630 нм (червоний), 590 нм (помаранчевий), 570 нм (жовтий), 520 нм (зелений), 470 нм (синій) потужністю 1 Вт (для зіставлення результатів проводились вимірювання у темряві). ВАХ гетероструктур в лабораторній атмосфері при дії освітлення з різною довжиною хвилі зображено на рис. 7 (нормована на мінімальну кількість квантів).

Аналіз характеристик дає можливість говорити про збільшення відгуку вказаних структур, при впливі освітлення. Як видно з рис. 7, світло різної довжини хвилі по-різному впливає на відгук гетероструктури з товщиною плівки 6 нм. При цьому, можна спостерігати певну кореляцію між відгуком гетероструктури, при опроміненні світлом, та коефіцієнтом поглинання на відповідній довжині хвилі (рис. 4). Проте, потрібно провести додаткове дослідження впливу світла на гетероструктуру з товщиною плівки ІТО 6 нм у зв'язку з тим, що коефіцієнт поглинання для помаранчевого (590 нм) та червоного (630 нм) діодів має, в межах похибки, однакове значення, але з рис. 7 видно, що відгук ВАХ на вказані діоди істотно різний. В той самий час, для гетероструктури з товщиною плівки ІТО 12 нм під впливом світла ВАХ змінюється мало в порівнянні зі гетероструктурою з товщиною плівки ІТО 6 нм. Зрозуміло, що це пов'язано з меншим коефіцієнтом поглинання даної структури на відповідних довжинах хвиль (рис. 4). ВАХ при опроміненні світлом з довжиною хвилі 470 нм дещо відрізняється від інших, оскільки коефіцієнт поглинання структури на довжині хвилі 470 нм трохи вищий від коефіцієнта поглинання при більшій довжині хвилі.

Зазначимо, що у випадку освітлення збільшення відгуку гетероструктури доцільно пов'язувати не з власним поглинанням In_2O_3 чи SnO_2 (ширина забороненої зони $\sim 4 \text{ eV} = 300 \text{ nm}$, в той час як довгохвильова границя випромінювання синього світлодіода лежить в діапазоні 410 nm), а саме з поглинанням в області просторового заряду. Окрім того, доцільно говорити про збудження домішкових або дефектних центрів [18], включаючи і поверхневі центри, які зв'язані з адсорбентом [39].

4. Висновки

За допомогою методу магнетронного розпилення на постійному струмі з оксидної мішені створено серію гетероструктур $95\% \text{In}_2\text{O}_3 + 5\% \text{SnO}_2/\text{ns-Si}$. Аналіз вольт-амперних характеристик виготовлених зразків показав, що насичені пари спиртів впливають на електричні властивості розглянутих гетероструктур. Товщину наноструктурованої плівки у 12 nm , отриманої у розглянутих технологічних умовах, можна вважати оптимальною для детектування парів спирту (етилового та ізопропілового).

Показано, що відгук системи добре корелює з коефіцієнтом поглинання світла. При цьому, для суттєвого впливу опромінення на параметри газочутливих структур необхідно застосовувати світло з довжиною хвилі менше 400 nm , тобто область, близьку до ультрафіолету.

1. Y. Sato, R. Tokumaru, E. Nishimura, P. Song, Yu. Shigesato, K. Utsumi, and H. Iigusa, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23**, 1167 (2005).
2. G. Korotcenkov, *Mater. Sci. Eng: B* **139**, 1 (2007).
3. B.R. Eggins, *Biosensors: An Introduction* (Wiley, Chichester, 1996).
4. *An Introduction to Bioanalytical Sensors Techniques in Analytical Chemistry*, edited by A.J. Cunningham (Wiley, Chichester, 1996).
5. *Gas Sensors Principles, Operation, and Developments*, edited by G. Sberveglieri (Kluwer Dordrecht, 1992).
6. *Semiconductor Sensors in Physico-Chemical Studies: Handbook of Sensors and Actuators*, edited by L.Y. Kupriyanov (Elsevier, Amsterdam, 1996).
7. S.Y. Yurish, *Digital Sensors and Sensor Systems: Practical Design* (IFSA Publishing, 2011).
8. A. Ayeshamariam, M. Bououdina, and C. Sanjeeviraja, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **16**, 686 (2013).
9. Л.А. Обвинцева, *Рос. хим. ж.* **LI**, 113 (2008).
10. С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза, Т.В. Свистова, О.И. Борсякова, *ФТП* **40**, 57 (2006).
11. С.И. Рембеза, Ю.В. Шматова, Т.В. Свистова, Е.С. Рембеза, Н.Н. Кошелева, *ФТП* **46**, 1213 (2012).
12. S.K. Tripathy, B.P. Hota, and V.S. Jahnnavy, *Zh Nano-Electron. Fiz.* **5**, 04055 (2013).
13. С.И. Рембеза, П.Е. Воронов, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, *ФТП* **45**, 1538 (2011).
14. Д.И. Биленко, О.Я. Белобровая, Э.А. Жаркова, Д.В. Терин, Е.И. Хасина, *ФТП* **39**, 834 (2005).
15. O.I. Bomk, L.G. P'chenko, V.V. P'chenko, A.M. Pinchuk, V.M. Pinchuk, G.V. Kuznetsov, V.I. Strykha, *Sensor. Actuat. B* **62**, 131 (2000).
16. R. Balasundaraprabhua, E.V. Monakhova, N. Muthukumarasamyb, O. Nilsena, and B.G. Svenssona, *Mater. Chem. Phys.* **114**, 425 (2009).
17. Dewei Chu, Yu Ping Zeng, Dongliang Jiang, and Yo. Masuda, *Sensor. Actuat. B* **137**, 630 (2009).
18. Zhizhong Yuan, Dongsheng Li, Minghua Wang, Peiliang Chen, Daoren Gong, Peihong Cheng, and Deren Yang, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 121908 (2008).
19. H.B. Huo, C. Wang, F.D. Yan, H.Z. Ren, and M.Y. Shen, *J. Nanosci. Nanotechnol.* **9**, 4817 (2009).
20. L.G. P'chenko, A.A. Chuiko, V.V. Lobanov, and V.V. P'chenko, in *Technical Digest of the 18th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2005)* (Oxford, 2005), p. 200.
21. А.И. Беляева, А.А. Галуза, С.Н. Коломиец, *ФТП* **38**, 1050 (2004).
22. O.I. Barchuk, A.A. Goloborodko, V.N. Kurashov, Y.A. Obremok, and S.N. Savenkov, *Proc. SPIE* **6254**, 62540W (2006).
23. O.I. Barchuk, T.V. Molebna, A.G. Chumakov, V.N. Kurashov, and V.V. Marjenko, *Proc. SPIE* **2648**, 62540W (2006).
24. A.A. Goloborodko, M.V. Epov, L.Y. Robur, and T.V. Rodionova, *Zh. Nano-Electron. Fiz.* **6**, 02002 (2014).
25. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry. Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Chichester, 2007).
26. Л.А. Головань, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров, *УФН* **177**, 619 (2007).
27. G.E. Jellison Jr., T.E. Haynes, and H.H. Burke, *Opt. Mater.* **2**, 105 (1993).
28. А.А. Голобородько, *Ж. наноелектрон. фіз.* **5**, 03048 (2013).
29. N.S. Goloborodko, V.M. Telega, and V.V. P'chenko, in *Abstracts of the 8th International Scientific Conference "Electronics and Applied Physics"* (Kyiv: 2012), p. 94.
30. *Handbook of Chemical and Biological Sensors*, edited by R.F. Taylor and J.S. Schultz (IOP Publishing House, Bristol, 1996).
31. В.В. Болотов, В.Е. Росликов, Е.А. Курдюкова, О.В. Кривоzubов, Ю.А. Стенькин, Д.В. Чередов, *ФТП* **46**, 109 (2012).
32. A. Fort, M. Mugnaini, S. Rocchi, M.B. Serrano-Santos, V. Vignoli, and R. Spinicci, *Sensor. Actuat. B* **124**, 245 (2007).

33. O.M. Lovvik, S. Diplas, A. Romanuk, and A. Ulyashin, *Appl. Phys.* **115**, 083705 (2014).
34. Н.С. Голобородько, В.В. Ильченко, Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки, 296 (2012).
35. M.G. Nakhodkin, Y.S. Musatenko, and V.N. Kurashov, *Proc. of SPIE* **3402**, 333 (1998).
36. А.О. Голобородько, В.І. Григорук, М.М. Котов, В.Н. Курашов, Д.В. Поданчук, Н.С. Сутягіна, *УФЖ* **53**, 946 (2008).
37. П.Н. Крылов, Р.М. Закирова, И.В. Федотова, *ФТП* **47**, 1421 (2013).
38. А.М. Гуляев, Ван Ле Ван, О.Б. Сарач, О.Б. Мухина, *ФТП* **42**, 742 (2008).
39. С.И. Рембеза, Н.Н. Кошелева, Е.С. Рембеза, Т.В. Свиствова, Ю.В. Шматова, *Gang Xu*, *ФТП* **45**, 612 (2011).

Одержано 12.06.15

*В.А. Виниченко, В.В. Бученко, Н.С. Голобородько,
В.В. Лендел, А.Е. Лушкін, В.Н. Телега*

ОПТИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ГЕТЕРОСТРУКТУР 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si

Резюме

В работе рассматриваются оптические и электрофизические свойства гетероструктур 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si с толщиной пленок 6 и 12 нм, которые наносились методом магнетронного распыления на структурированную поверхность кремния. Показано, что для пленки толщи-

ной 6 нм характерно наличие нескольких пиков оптического поглощения, тогда как в структуре с толщиной 12 нм в том же спектральном диапазоне эти максимумы отсутствуют. Определено влияние газовой среды и оптического излучения на электрофизические свойства структур 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si и показано, что отклик исследуемых структур на газовую среду связан с диэлектрической проницаемостью адсорбата. Результаты данного исследования можно применять при разработке резистивных газовых сенсоров на основе пленок 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si.

*V.A. Vinichenko, V.V. Buchenko, N.S. Goloborodko,
V.V. Lendel, A.E. Lushkin, V.N. Telega*

OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si HETEROSTRUCTURE

S u m m a r y

Optical and electrical properties of 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si heterostructures with films 6 and 12 nm in thickness deposited on a nanostructured silicon surface by the magnetron sputtering have been considered. It is shown that the 6-nm film is characterized by several peaks in the optical absorption spectrum, while the 12-nm film has no absorption peaks in the same spectral interval. The influence of the environment and the optical irradiation on the electrical properties of 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si structures is determined. Their response to the gas environment is shown to be governed by the dielectric permittivity of an adsorbate. The results obtained can be used in the development of resistive gas sensors based on 95% In₂O₃ + 5% SnO₂/ns-Si films.