

М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев*

ВЛАСТИВОСТІ, СТРУКТУРА, СПОСОБИ ОДЕРЖАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОКСИДУ ІНДІЮ ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ У ТЕХНОЛОГІЯХ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ТА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ (ОГЛЯД)

Наведено огляд літературних даних щодо загальних властивостей та структури оксиду індію In_2O_3 , проведено аналіз методів одержання матеріалів на його основі, розглянуто застосування оксиду індію у різних галузях напівпровідникової та електронної техніки.

Ключові слова: оксид індію, напівпровідник, прозорі провідні шари, мікроелектронній пристрій, фізичні властивості.

Вступ

Актуальною проблемою сучасної напівпровідникової та електронної техніки є створення, дослідження та застосування тонкоплівкових елементів на основі різних напівпровідникових матеріалів, серед яких, як зазначено в роботі [1], найбільше застосування знаходять прозорі провідні покриття (ППП). Покриття являють собою різні тонкоплівкові матеріали (напівпровідникові оксиди металів, полімери, вуглецеві структури), котрі мають високу електропровідність та гарну оптичну прозорість [2, 3] і серед них ППП на основі металооксидів (MeO). Більшість із них — це бінарні з'єднання (In_2O_3 , ZnO , SnO_2 , CdO , WO_3 , Ga_2O_3 , TiO_2), які містять один металічний елемент, та більш складні подвійні та потрійні оксиди, що, завдяки їх прозорості у широкому діапазоні електромагнітного спектра (~90% у видимому діапазоні), електропровідності та високій реакційній здатності поверхні широко використовуються у сучасній техніці і виділені в групу "прозорих провідних оксидів" ("transparent conductive oxide" — TCO) [4]. Зазначимо, що перші плівки TCO отримані у 1907 р. шляхом термічного окиснення кадмію [5]. Такі плівки були одночасно електропровідними та оптично прозорими, але у зв'язку з токсичністю CdO постало питання їх заміни на інший більш безпечний матеріал з подібними властивостями. У стехіометричному складі дані сполуки є діелектриками, однак через велику кількість внутрішніх дефектів, котрі проявляються у наявності кисневих вакансій або у присутності міжвузлових атомів металу, вони можуть ставати напівпровідниками з широкою забороненою зоною (наприклад, >3 eV). Представлені оксиди використовуються для виготовлення тонких дисплеїв, органічних світлодіодів, сонячних батарей, тонкоплівкових транзисторів, газових сенсорів, космічних апаратів тощо. Для збільшення провідності ці оксиди звичайно легують атомами Sb, In, Sn, Ti,

* М. Ф. Григоренко — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ; Є. П. Черніговцев — науковий співробітник цієї ж установи.

F, Al, Ga. Висока провідність ППП ($n = 1019\text{—}1021 \text{ см}^{-3}$) забезпечується введенням домішкових атомів. Легування дозволяє збільшити концентрацію носіїв заряду за рахунок неглибоких домішкових рівней, що утворюються у зонній структурі MeO. В процесі легування керуються наступним правилом. Атом домішки має мати валентність вищу, ніж у атома металу, який утворює оксидну сполуку. У цьому випадку матеріал буде мати провідність n -типу [6]. Окрім високої провідності, ППП мають також гарну оптичну прозорість (коефіцієнт пропускання $T > 80\%$) у видимій та інфрачервоній області електромагнітного спектра. Отже, вікно пропускання ППП знаходиться у діапазоні $\lambda = 400\text{—}1500 \text{ нм}$. Оптичні та електричні властивості ППП залежать від технології одержання, вибір якої, як правило, пов'язаний з урахуванням оптимального функціонування покриття для конкретного використання з метою зведення до мінімуму витрат на виробництво. Нанесення металооксидних покриттів можна здійснити фізичними або хімічними методами, а також їх комбінаціями. Очевидно, що характеристики прозорих провідних шарів у значній мірі визначаються методами їх формування. Останнім часом одним із найбільш промислово-запитаним провідним оксидом для формування шарів TCO у системах відображення інформації є твердий розчин оксидів індію та олова In_2O_3 , легований атомами Sn ("indium—tin oxide" — ITO) [7]. Шари ITO, окрім високої електричної провідності та прозорості у видимому діапазоні довжин хвиль (400—680 нм), характеризуються також виключно високою хімічною стійкістю. Слід зазначити, що усі ці позитивні якості у значній мірі нівелюються високою вартістю та обмеженими обсягами добування індію і як альтернатива одним із найбільш перспективних матеріалів TCO є оксид цинку, легований елементами III групи періодичної системи елементів [8—24].

Дана робота присвячена аналізу та систематизації основних відомостей щодо властивостей оксиду індію та матеріалів на його основі і їх практичного застосування, а також перспектив подальшого дослідження зазначеного актуального оксидного матеріалу.

Структура та будова оксиду індію

Будучи оптично прозорим широкозонним напівпровідником, оксид індію використовується для виробництва компонентів високопотужних напівпровідникових приладів (тиристорів, варисторів та інш.), ультрафіолетових фільтрів, фотодетекторів, фотоперетворювачів, оптоелектронних пристроїв [25]. У той самий час оксид індію є чутливим до вмісту в атмосфері таких газів, як NO, NO₂, CO, CO₂, O₃, що робить його одним із основних матеріалів для створення сенсорів резистивного типу, котрі детектують зазначені гази. В останній час увагу дослідників в області сенсорики викликають зразки нанокристалічного оксиду індію — матеріалу, що складається із зерен кристалічного In_2O_3 нанометрового розміру. Очевидно, що, зменшуючи розмір нанокристалів, можна помітно збільшити питому поверхню зразка, це спричинить підвищення чутливості сенсору на основі In_2O_3 . Оскільки сенсори на основі In_2O_3 є приладами резистивного типу (тобто їх опір змінюється в результаті адсорбції), першочерговим питанням для створення таких сенсорів з оптимальними

характеристиками є виявлення механізмів переносу носіїв заряду в нанокристалічному In_2O_3 . Таке саме питання є важливим і у випадку використання нанокристалічного In_2O_3 для створення електронних та оптоелектронних приладів. На даний момент більшість робіт присвячено дослідженню електричного транспорту у добре провідному та прозорому у видимій області спектра складному оксиді на основі SnO_2 та In_2O_3 . Існують також роботи щодо механізмів провідності у моно- та полікристалічному (що складається із кристалів мікроного розміру) In_2O_3 . Проте перехід в область нанометрових розмірів може суттєвим чином змінити як величину провідності, так і механізм переносу носіїв заряду за рахунок появи великої кількості локалізованих поверхневих станів і, можливо, прояву квантово-розмірних ефектів.

Структуру кристалічного оксиду індію досліджено детально у багатьох роботах [26—31] і описано, зокрема, в [32, 33]. Загалом, у відповідності до теоретичних розрахунків кристал оксиду індію може мати три поліморфні модифікації. Експериментально знайдено тільки дві модифікації. У переважній кількості випадків оксид індію кристалізується у кубічну структуру типу биксбіїту. Елементарна комірка цієї структури представлена на рис. 1 і складається із 80 атомів (32 атома індію та 48 атомів кисню) [29, 34]. Також індію у комірці присутній у двох різних станах з відмінною симетрією — так званий стан $\text{In}-b$ (8 атомів на комірці) та стан $\text{In}-d$ (24 атома на комірці). Так, елементарну комірку оксиду індію можна розділити на кілька підґраток, котрі являють собою деформовані куби, всередині яких знаходяться атоми індію, а у вершинах розташовано атоми кисню. У підґратках одного типу не зайнято дві протилежні вершини куба, що лежать на одній діагоналі куба (підґратки b , рис. 2), а в підґратках другого типу не зайнято дві вершини, що лежать на діагоналі грані куба (підґратки d , рис. 2 [33]), 25% катіонів індію розміщуються у підґратках типу b , а 75%, що залишилися, розташовано у підґратках типу d [30, 31].

Рис. 1. Об'ємно центрована кубічна структура оксиду індію, яка показує елементарну комірку. Чорні та білі сфери — атоми індію та кисню відповідно [35]

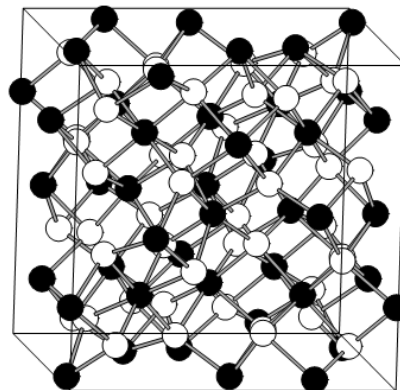


Fig. 1. Indium oxide volume-centered cube structure showing unit cell. Black and white spheres — indium and oxygen atoms respectively [35]

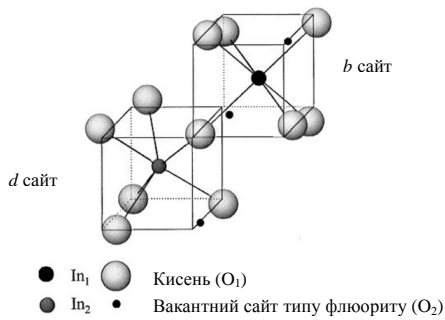


Рис. 2. Підґратки b та d у структурі In_2O_3 [20]: b — In—O . 0,218 нм; d — In—O . 0,213, 0,219, 0,223 нм

Fig. 2. Sublattices b and d in In_2O_3 structure [20]: b — In—O . 0,218 nm; d — In—O . 0,213, 0,219, 0,223 nm

Щодо структури нанокристалічного оксиду індію — матеріалу, який складається із зерен кристалічного In_2O_3 нанометрового розміру, зазначимо, що згідно з даними, отриманими методами електронної дифракції, структура кристалітів нанокристалічного оксиду не відрізняється від структури кристалічного оксиду індію [36—39]. Плівки оксиду індію, аналогічно масивним кристалам, мають об'ємно центровану кристалічну ґратку і складаються із зерен із переважною орієнтацією відносно напрямків $\langle 111 \rangle$ або $\langle 100 \rangle$ та параметром комірки 1,0117 нм [27].

Точкові дефекти в оксиді індію

Дефекти, що виникають в структурі напівпровідникових матеріалів, можуть суттєво впливати на їх фізичні та хімічні властивості. В оксидах особливо важливими є кисневі вакансії, оскільки вони, як правило, є донорами електронів. Саме вакансії часто зумовлюють властивості, які корисні в багатьох сферах застосування, зокрема в детектуванні газів, гетерогенному каталізі, фотокаталізі тощо [40—43]. Питання точкових дефектів в оксиді індію висвітлено, зокрема, в роботах [44, 26].

Дефектами в оксиді індію можуть бути вакансії кисню та індію, а також міжвузлові атоми індію [32]. Енергії утворення цих дефектів розраховувались із перших принципів [45—48]. Енергія утворення міжвузлового атома індію дуже велика і тому його вміст в оксиді індію нехтовно малий. Енергія утворення вакансій кисню найнижча серед інших дефектів, проте дослідники мають різні погляди щодо її величини. Вакансії кисню можуть бути у трьох зарядових станах — нейтральному, однократно ($1+$) та двократно зарядженому ($2+$). У цьому випадку стабільними є лише нейтральна та двократно заряджена вакансія кисню. Енергія утворення кисневих вакансій може зменшуватись поблизу поверхні, як показано в роботі [49].

Вакансії індію є глибокими акцепторами і можуть захоплювати до трьох електронів. Енергія утворення цих вакансій достатньо висока і їх утворення можливе, коли оксид індію стає сильно виродженим напівпровідником (з високим рівнем легування). Через це у невиродженому оксиді індію концентрація вакансій індію, так само як і міжвузлових атомів індію, нехтовно мала [48, 50].

Загальні властивості оксиду індію

Фізичні та хімічні властивості

Згідно з роботами [51—55], оксид індію являє собою аморфну речовину або світло-жовті кристали (червоно-коричньові у ході нагрівання), утворює кристали кубічної сингонії, просторова група $Ia\bar{3}$, параметри комірки $a = 1,01194$ нм, $Z = 16$. За тиску $6,5$ ГПа та за температури $300—400$ °С переходить у фазу з гексагональною ґраткою, стабільною за нормальних умов. Кристали належать до просторової групи $R\bar{3}c$, параметри комірки: $a = 0,5487$ нм, $c = 1,4510$ нм, $Z = 6$, щільність — $7,3$ г/см³. За умов надлишкового тиску кисню In_2O_3 плавиться за температури 1910 °С, а за звичайних умов легко сублімує та починає розкладатися (850 °С).

Оксид індію з нагріванням сублімує з розкладом. Реагує з концентрованими кислотами та лугами під час плавлення. Відновлюється воднем до металу. У ході прожарювання у потоці аміаку утворює нітрид індію. Реагує із сірководнем.

Структурні властивості тонких плівок на основі оксиду індію

Плівки In_2O_3 та ІГО [56] (суміші оксидів індію та олова) аналогічно масивним кристалам мають об'ємноцентровану кристалічну ґратку і складаються із зерен з переважною орієнтацією відносно напрямку $\langle 111 \rangle$ або $\langle 100 \rangle$ [57—60]. В процесі одержання плівок методом іонного розпилення у тліїному розряді на постійному струмі на напрям орієнтації зерен суттєвий вплив спричинюють такі параметри процесу осадження, як температура підкладки, швидкість розпилення та парціальний тиск кисню [61]. Щодо наявності у цих плівках фази, котра являє собою хімічну сполуку Sn, дані суперечливі. У плівках, нанесених методом іонного розпилення, Боушел та інші [62] виявили Sn_2O_4 , тоді як у плівках, отриманих методом пульверизації з наступним піролізом, виявлено SnO_2 за концентрацією Sn вище $60—80\%$ (мас.) [60]. Проте Меніфейсер та інші [59] не спостерігали фази, що складається із сполуки Sn.

Електричні властивості

Питомий опір, концентрація носіїв та їх рухливість у плівках In_2O_3 звичайно складають $2 \cdot 10^{-4}—19^{-2}$ Ом·см, $10^{19}—2 \cdot 10^{21}$ см⁻³ та $15—70$ см²/(В·с) відповідно. Для плівок, що осаджуються за методом пульверизації з наступним піролізом, оптимальний атомний вміст Sn, який забезпечує високі значення питомої провідності та оптичного коефіцієнта пропускання, складає 10% . З більш високим вмістом Sn питома провідність зменшується [60] через утворення у плівках In_2O_3 кластерів $(\text{SnO}_2)_2$. Детальних досліджень механізму провідності у плівках In_2O_3 не проводилось. Переважним механізмом розсіювання носіїв у невироджених плівках, що одержуються реактивним іонним розпиленням [62], є, вірогідно, розсіювання на границях зерен. Рядом авторів [58, 63—65] наведено дані щодо впливу відпалу у різних атмосферах на питомий опір плівок, що осаджуються методом іонного розпилення. Спостережувані зміни цієї величини можуть бути пояснені укрупненням зерен [58], дифузиею кисню

всередины плівки або його екзодифузією [63], а також зміною властивостей границь зерен [64]. Легування плівок In_2O_3 кадмієм забезпечує низький питомий опір ($\sim 3,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·см) з концентрацією n -носіїв $\sim 3 \cdot 10^{20}$ см⁻³ та їх рухомості μ , що приблизно дорівнює 6 см²/(В·с) [66]. Дуже високі значення рухомості носіїв отримані після легування плівок титаном ($\mu \approx 120$ см²/(В·с), $n \approx 10^{20}$ см⁻³) та цирконієм ($\mu \approx 170$ см²/(В·с), $n \approx 8 \cdot 10^{19}$ см⁻³).

Оптичні властивості

Оксид індію має “непряму” заборонену зону шириною $2,6$ еВ [66], а дозволені прямі оптичні переходи, згідно з даними різних авторів [63, 65—67], відповідають енергіям $3,6$ — $3,85$ еВ. Зі зміною концентрації носіїв n величина зсуву Бурштейна—Мосса змінюється пропорційно $n^{2/3}$, що свідчить про параболічність зони провідності [60, 63, 67]. Значення ефективної маси носіїв, визначені з урахуванням величини цього зсуву, лежать у межах від $0,25m_e$ до $0,45m_e$ [60, 63, 67, 68], причому розрахункові значення наведеної маси завжди більші ефективної маси електронів, що можливо за умови від’ємної кривизни валентної зони [67].

Методи одержання та застосування

У техніці напівпровідників для отримання матеріалів на основі In_2O_3 з високою електропровідністю із більш ранніх робіт відомий спосіб одержання плівок оксиду індію із суміші In та In_2O_3 випаровуванням у вакуумі з утворенням на підкладці плівки In_2O завтовшки $200,0$ нм з наступним окисненням плівки до In_2O_3 [68]. Згідно з [69], керамічні зразки оксиду індію одержують пресуванням порошку In_2O та спіканням за температури 1300 °С на повітрі з витримкою протягом 4 год. Одержані у вказаний спосіб керамічні зразки оксиду індію мають електропровідність $1,12 \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·см⁻¹. Отже, даний спосіб не дає можливості одержати кераміку In_2O_3 з високою електропровідністю, наприклад, близькою до плівкової. Дещо вища електропровідність $(0,125—2) \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·см⁻¹ досягнута у роботі [70]. З метою підвищення електропровідності кераміки на основі оксиду індію у [68] авторами був запропонований наступний спосіб.

Із порошків In_2O_3 (марки особливої чистоти) пресують брикети за температури 25 °С і тиску $10—20$ МПа. Ці брикети піддають послідовним відпалам в інтервалі $1200—1600$ °С, підвищуючи температуру у кожному наступному відпалі на $100—150$ °С, витримка за кожної фіксованої температури 5 год із наступним гартуванням на повітрі. Потім брикети подрібнюють до розміру частинок $10—15$ мкм і пресують зразки заданої конфігурації за температури $1000—1100$ °С і тиску $0,05—0,1$ ГПа. Виміряні значення електропровідності кераміки на основі оксиду індію у залежності від режиму термообробки вихідного матеріалу та режиму пресування виробів наведені у таблиці. Дані показують, що електропровідність кераміки із оксиду індію, згідно з описаним способом, різко зростає і складає 700 Ом⁻²·см⁻².

**Електропровідність та режими термообробки і пресування
кераміки на основі оксиду індію**

**Electroconductivity, thermal treatment and pressing rates of oxide
indium based ceramics**

Температура термообробки, °С	Режим гарячого пресування	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹
	1000 °С, 0,05 ГПа	25
1200	1050 °С, 0,05 ГПа	35
1300	1050 °С, 0,07 ГПа	50
	1100 °С, 0,1 ГПа	45
1200	1050 °С, 0,07 ГПа	260
1300		
1450		
1200		700
1300	1050 °С, 0,07 ГПа	
1450		
1600		

Випробування показали, що керамічні зразки оксиду індію, виготовлені за пропонованим способом, можуть працювати в інтервалі температур 25—900 °С у вакуумі 0,0013332 Па і на повітрі в інтервалі 25—1400 °С без суттєвих змін електрофізичних та міцнісних властивостей.

Як зазначають автори [68], використання запропонованого способу одержання кераміки оксиду індію забезпечує в порівнянні з відомими можливість здобуття підвищених електрофізичних та міцнісних властивостей, що особливо важливо в електронній і напівпровідниковій техніці, можливість використання даної кераміки в широкому температурному інтервалі як у середовищі повітря, так і вакууму без суттєвих змін набутих властивостей, а також без об'ємних змін, оскільки даний оксид за вказаних умов не має фазових перетворень.

У зв'язку з широким розповсюдженням і застосуванням в останні роки прозорих провідних покриттів розглянемо більш детально методи їх отримання.

Як вже зазначалося, прозорі провідні оксиди і поміж них оксид індію знаходять широке застосування в оптоелектроніці [71]. Поєднання значної ширини забороненої зони з високою концентрацією носіїв заряду визначає оптичні властивості In_2O_3 — високу прозорість у видимій області електромагнітного спектра та високу відбивність в ІЧ-області [72, 73].

Оксид індію механічно міцний, тонкі плівки In_2O_3 мають хорошу адгезію до багатьох матеріалів. Використовуються як прозорі провідні

покриття для виготовлення рідкокристалічних дисплеїв, моніторів портативних комп'ютерів, електролюмінесцентних ламп, електродів до фотопровідних сонячних та паливних елементів (у тому числі до високотемпературних) [74, 75].

Відомо багато способів одержання прозорих провідних плівок на основі оксиду індію. У роботі [76] плівки оксиду індію завтовшки 400 нм, отримані термічним осадженням металічного індію на скляні підкладки за кімнатної температури з наступним відпалом на повітрі за температури 423 и 623 К протягом 60 с, мали пропускання у видимій області та ближньому ІЧ близько 95%, відбиття — 2%, ширину забороненої зони — 3,7—3,8 еВ, середнє значення коефіцієнта заломлення — 1,4.

Плівки оксиду індію, одержані методом імпульсного лазерного осадження за низької температури підкладки, були аморфними, а за високої температури мали кристалічну структуру. Електроопір склав значення $3 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, оптичне пропускання у видимому діапазоні — 87% [77], 362 К.

Застосування реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі у процесах одержання плівок оксиду індію базується на наступних перевагах: розпилення металічної мішені індію у присутності реактивного газу кисню, високі швидкості осадження, однорідність плівок на великих площинах та прецизійний контроль складу осадженої плівки.

Фізичні властивості плівок In_2O_3 , що осаджені даним методом, залежать від параметрів розпилення, таких як парціальний тиск кисню, температура підкладки, напруга зміщення підкладки, тиск розпилення, відстань мішень-підкладка [78, 79]. У роботі [80] методом реактивного високочастотного розпилення з одночасною іонною обробкою одержано тонкі плівки оксиду індію, пропускання котрих в оптичному діапазоні 450—1100 нм склало 80%, ширина забороненої зони — 3,50—3,60 еВ. Характеристики плівок визначали значенням струму іонної обробки, яка у процесі розпилення зменшує їх питомий опір до $2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см.

Синтез плівок In_2O_3 здійснюється також методом газофазового осадження [81, 82], золь-гель методом [83], пошаровим атомним осадженням та інш. Проте ці методи потребують високої температури підкладки під час осадження до 773 К або наступного відпалу плівок за температури до 973 К [84]. Ця умова спричиняє певні труднощі в процесі синтезу плівок In_2O_3 на термочутливих підкладках та для використання у гнучких оптоелектронних пристроях, сонячних елементах, органічних світло-випромінюючих діодах. Таким чином, розробка низькотемпературних методів синтезу плівок In_2O_3 , що не потребують наступної термічної обробки та дозволяють отримувати плівки гарної якості, є актуальною задачею. Детальний опис такого методу наведено в роботі [71]. Автори осаджували плівки In_2O_3 на підкладки монокристалічного кремнію *n*-типу провідності. Для оптичних вимірювань використовували підкладки із плавленого кварцу, очищення яких здійснювали у хромовій суміші з наступною промивкою у деіонізованій воді. Осадження оксидних плівок проводили у модернізованій установці СІАМ, побудованій на базі вакуумного поста УВН-1, методом реактивного магнетронного розпилення у плазмі аргону та кисню (50% Ar + 50% O₂) з загальним тиском у вакуумній камері $P_{\text{зар}} = 26,7 \cdot 10^{-2}$ Па. Перед процесом

розпилення камеру відкачували дифузійним насосом до залишкового тиску $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па. Струм розряду складав 0,1 А, напруга розряду — 424 В, час розпилення — 30 хв. Матеріалом катода слугувала мішень металічного індію із вмістом домішок не більше 0,01% (ат.). Термоокисдування здійснювали у реакторі печі резистивного нагрівання протягом 30 хв за температур 473, 623, 723 К. Рентгенофазовий аналіз плівок оксидів індію на кремнієвих підкладках та кварці проводили на дифрактометрі ДРОН-4-07 із використанням CoK_{α} -випромінення у режимі безперервного сканування з кутовим розділенням $0,1^{\circ}$ та за експозиції у кожній точці 1 с. Слід зазначити, що структурні та оптичні параметри плівок In_2O_3 , синтезованих методом реактивного магнетронного розпилення, навіть без наступної термообробки зіставні з параметрами плівок, які отримуються іншими методами за більш високих температур. Таким чином, розроблена авторами [71] технологія магнетронного реактивного осадження являє собою ефективний метод низькотемпературного синтезу тонких нанокристалічних плівок In_2O_3 , що особливо важливо для виробництва органічних світловипромінюючих діодів, сонячних елементів на термочутливих підкладках.

За останній час відбувається також стрімке зростання використання прозорих провідних плівок на основі більш складних подвійних оксидів (ТСО) [85]. Найбільш прозорим та запитаним провідним оксидом є оксид індію—олова In_9SnO_x ("indium-tin oxide" — ІТО) (рис. 3) [7]. Плівки ІТО мають високий коефіцієнт пропускання світла у видимій області спектра, гарну електропровідність, твердість та хімічну інертність. Вони можуть знайти широке застосування у будівельній та автомобільній індустрії за умов їх отримання масштабним маловитратним методом. Плівка ІТО відбиває інфрачервоні промені, що дає можливість використовувати її як теплозахисне покриття на віконних стеклах [86].

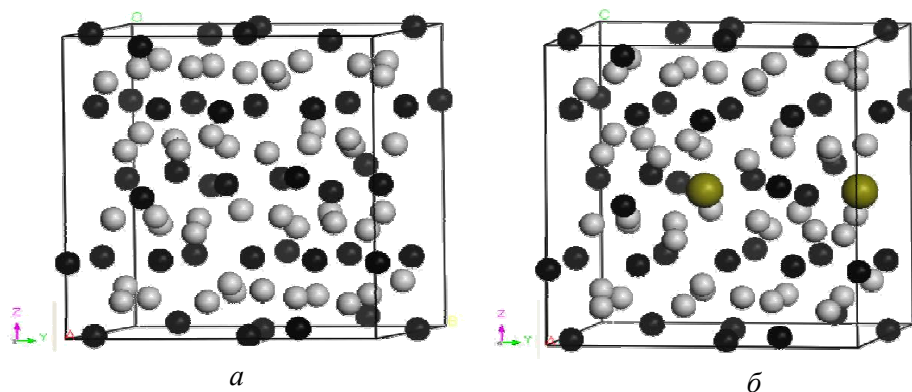


Рис. 3. Елементарна комірка чистого оксиду індію In_2O_3 (а) та оксиду індію In_2O_3 , легованого оловом (б). Темними кульками позначені атоми індію, світлими — атоми кисню, сірими — атоми олова [7]

Fig. 3. Unit cell of pure In_2O_3 (a) and that of indium oxide, doped by tin (b). Indium atoms are marked by the dark spheres, oxygen atoms — by the light ones and tin atoms — by the grey ones [7]

Актуальним є застосування ТСО плівок як прозорих електродів для електрохромного (ЕХ) скла. ЕХ-скло дозволяє зменшити втрати тепла, скоротити витрати на кондиціонування та освітлення, слугує альтернативою жалюзі та механічним затінюючим екранам або шторам. Поглинання або відбивання світла у видимій та ближній інфрачервоній області регулюється прикладеним електричним полем. Динамічний контроль сонячного світла та інфрачервоного випромінювання може значно знизити споживання енергії за жарких літніх та холодних зимніх умов. Матеріали використовуються в автомобільній індустрії для автоматичного затемнення дзеркал заднього виду автомобіля за різних умов освітлення, оскільки електрохромне скло забезпечує видимість навіть у затемненому стані і у такий спосіб зберігає візуальний контакт із зовнішнім середовищем. ЕХ-скло має відносно високу вартість.

Ще один цікавий приклад застосування ТСО плівок наведений в роботі [87], де описано одержання нанониток змішаного складу — з оксиду індію (80—95%) та цинку (IZO) методом електроспінінгу. Показано, що провідність нанониток IZO збільшується у ході опромінення світлом у діапазоні $\lambda = 230\text{—}290$ нм. Даний ефект може бути використаний для розробки сенсорів УФ випромінювання [88], які знаходять застосування у промислових установках, медичних приладах та в наукових цілях. Нещодавно компанія Rohm (Японія) розробила сенсор ультрафіолету з використанням тонких плівок із оксиду цинку [89]. Датчики на основі нанониток мають бути більш чутливими завдяки розмірному ефекту та більшій площі вільної поверхні.

Відомо також створення вузькосмугового фотоприймача ультрафіолетового випромінювання на основі нанокристалів оксиду індію. Нанокристали цікаві тим, що їх оптичні та електричні властивості залежать від їх розмірів. Завдяки цьому, варіюючи цей показник, можливо підлаштовувати кристал під випромінювання визначеної довжини, наприклад виключно під ультрафіолет. Вченими було запропоновано метод, з допомогою якого можливо синтезувати такий УФ-нанокристал із оксиду індію у плівці оксиду алюмінію. Його переваги полягають у тому, що, по-перше, можливо змінювати розмір нанокраплення (і відповідно, перелаштовувати оптичні властивості), по-друге, новий фотодетектор на основі кристалу має рекордні значення інтегральної чутливості та зовнішньої квантової ефективності.

Одним із активно досліджуваних напрямків газової сенсорики є створення напівпровідникових газових сенсорів, що працюють за умов додаткового підсвічування [25]. Однак для використання нанокристалічного In_2O_3 у таких приладах необхідне знання його оптичних та фотоелектричних властивостей. Ці самі властивості є ключовими і у випадку створення на його основі фотодетекторів, фотоперетворювачів та інших оптоелектронних пристроїв. Додамо, що авторка [25], визнаючи широку різноманітність методів отримання нанокристалічного оксиду індію, віддає перевагу золь-гель методу створення нанокристалічного оксиду із розміром нанокристалів від одиниць до десятків нанометрів. Зокрема, встановлено, що зразок, який має мінімальний розмір нанокристалів (7—8 нм), є фоточутливим до зеленого світла.

Як зазначається в роботі [7], за умов розвитку опто-, мікро- та наноелектроніки на полімерних підкладках та з використанням полімерних матеріалів, що чутливі до високих температур обробки, виникають певні технологічні труднощі у ході синтезу плівок оксиду індію на термочутливих підкладках. Тобто актуальною проблемою є розробка низькотемпературних дешевих та простих методів отримання тонких плівок оксиду індію.

Також автор [7] акцентує увагу на важливій ролі досліджень, що присвячені взаємодії електромагнітного випромінювання та впливу на електричні та оптичні властивості тонких плівок прозорих провідних оксидів. Зокрема, встановлено, що в результаті впливу ультрафіолетового опромінення відбувається різке зменшення опору плівок оксиду індію з подальшим наступним відновленням опору. Ефект опромінення УФ світлом може бути використаний для поліпшення чутливості газових сенсорів, що базуються на основі тонких плівок оксиду індію. Значну увагу дослідників [90] привертають також напівпровідники, що виявляють феромагнетизм за кімнатної температури і мають високу температуру Кюрі, в зв'язку з можливим застосуванням у пристроях спітроніки.

Висновки

Актуальною проблемою сучасної напівпровідникової техніки та енергетики є розробка, створення та дослідження тонкоплівкових елементів, зокрема формування та дослідження напівпровідникових прозорих провідних шарів на основі оксиду індію, чому в останні роки приділюється значна увага. Це зумовлено унікальністю комбінації електричних та оптичних властивостей цих оксидів, що робить їх вельми перспективним матеріалом для цілого ряду галузей техніки та створення широкого різновиду мікроелектронних приладів. Зокрема, зазначені оксиди широко застосовуються як прозорі тепловідбивні покриття, гетеропереходи сонячних комірок, газові датчики, захисні покриття та прозорі електроди у пристроях оптоелектроніки тощо.

Подальші теоретичні та експериментальні дослідження цих матеріалів являють очевидний інтерес з точки зору фізики, хімії твердого тіла, фізико-хімії поверхні, матеріалознавства, оскільки дозволяють як визначити наприклад, енергетичні характеристики кисневих вакансій, зв'язок процесів переносу електронів із відхиленням складу від стехіометрії та інші фізичні параметри, так і удосконалити існуючі технології формування плівок високої якості, оскільки властивості прозорих провідних оксидних плівок сильно залежать від умов їх одержання і торкаються найважливіших проблем сучасної мікроелектроніки.

РЕЗЮМЕ. Представлен обзор литературных данных по общим свойствам и строению оксида индия (In_2O_3), проведен анализ методов получения материалов на его основе, рассмотрено применение оксида индия в разных отраслях электронной техники.

Ключевые слова: оксид индия, полупроводник, прозрачные проводящие слои, микроэлектронное устройство, физические свойства.

1. *Лепескин Ю. П.* Получение и исследование тонких проводящих оксидов для солнечной энергетики // Молодой ученый. — 2017. — № 2. — С. 143—148. URL <https://moluch.ru/archive/136/38237/>
2. *Кондрашин В. И.* Прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов. Технологии получения, свойства и области применения / [В. И. Кондрашин, Н. О. Рыбакова, С. В. Ракша и др.] // Там же. — 2015. — № 13. — С. 128—132.
3. *Kawazoe H.* P-type electrical conduction in delafossite CuAlO_2 thin films / [H. Kawazoe, M. Yasukawa, T. Tahisawa et al.] // Nature. — 1997. — **389**. — P. 939—942.
4. *Румянцева М. Н.* Химическое модифицирование нанопорошков диоксида олова для селективных газовых сенсоров / М. Н. Румянцева, А. М. Гаськов // IV Всерос. конф. по наноматериалам НАНО-2011, 01—04 марта 2011 г. — Москва : ИМЕТ РАН, 2011.
5. *Bädeker K.* Über die elektrische leitfähigkeit und die thermoelektrischekraft einiger schwermetallverbindungen // Ann. Phys. Publ. — 1907. — **22**. — 749 p.
6. *Stadler A.* Transparent conducting oxides—an up-to-date overview // Materials. — 2012. — No. 5. — P. 661—683.
7. *Тамбасов И. А.* Тонкие In_2O_3 , $\text{Fe—In}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—ZnO}$ пленки, полученные твердофазными реакциями: структурные, оптические, электрические и магнитные свойства: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Красноярск, 2013. — 116 с.
8. *Lee K.* Structural and electrical properties of Al—doped ZnO and Al, B codoped ZnO films deposited on flexible substrate / [K. Lee, H. Kang, T.-Y. Lee et al.] // J. Korean Phys. Soc. — 2008. — **53** (5). — P. 2407—2411.
9. *Muranaka T.* Doping profiles and nanostructural properties of molecular—beam—deposited GZO thin films on glass substrates / [T. Muranaka, T. Uehara, T. Sakano et al.] // Ibid. — 2008. — **53** (5). — P. 2897—2903.
10. *Robbins J. J.* Transport phenomena in high performance nanocrystalline ZnO:Ga films deposited by plasma—enhanced chemical vapor deposition / [J. J. Robbins, J. Harvey, J. Leaf et al.] // Thin Solid Films. — 2005. — **473** (1). — P. 35—41.
11. *Zhong J.* Ga—doped ZnO single—crystal nanotips grown on fused silica by metalorganic chemical vapor deposition / [J. Zhong, S. Muthukumar, Y. Chen, Y. Lua]// Appl. Phys. Lett. — 2003. — **83** (16). — P. 3401—3405.
12. *Новодворский О. А.* Оптические и структурные характеристики пленок оксида цинка, легированных галлием / [О. А. Новодворский, Л. С. Горбатенко, В. Я. Панченко и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2009. — **43** (4). — С. 439—442.
13. *Лашкова Н. А.* Синтез наноструктур на основе оксида цинка для создания гетероструктурных фотовольтаических элементов // Там же. — 2016. — **50**, №. 9. — С. 142—149.
14. *Бобков А. А.* Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов // Там же. — 2015. — **49**, № 10. — С. 1402—1406.

15. *Лашкова Н. А.* Синтез гетероструктур ZnO—CuO методом спрей-пиролиза для создания фотовольтаических элементов // Сб. трудов III Всерос. науч. конф. Министерства образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский гос. ун-т им. И. Н. Ульянова", 2015. — С. 22—26.
16. *Абрашова Е. В.* Исследование влияния введения соединений Cu на свойства прозрачных проводящих пленок на основе ZnO—SnO₂—SiO₂, полученных методом золь-гель // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2013. — **13**, № 1. — С. 154—155.
17. *Pronin I. A.* The thermo voltaic effect in zinc oxide in homogeneously doped with mixed-valence impurities // Techn. Phys. Lett. — 2015. — **41**, No. 10. — P. 930—932.
18. *Пешкова Т. В.* Структуры из нанопроводов с переходами Zn—ZnO: CuO для детектирования паров этанола // Журн. техн. физики. — 2014. — **84**, № 5. — С. 143—148.
19. *Максимов А. И.* Основы золь-гель технологии наноконпозигов. — С. - Пб. : Изд-во Элмор, 2008. — 255 с.
20. *Nam G. M.* Al—doped ZnO via sol-gel spin-coating as a transparent conducting thin film / G. M. Nam, M. S. Kwon // J. Information Display. — 2009. — **10** (1). — P. 24—28.
21. *Pronin I. A.* Theoretical and experimental investigations of ethanol vapour sensitive properties of junctions composed from produced by sol-gel technology pure and fe modified nanostructured zno thin films // Sensors and Actuators A: Physical. — 2014. — **206**. — P. 88—96.
22. *Левуцкий В. С.* Диагностика приборных структур на основе кремниевых и углеродных слоев методом спектроскопии комбинационного рассеяния света: дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2016. — 126 с.
23. *Александрова О. А.* Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование / [О. А. Александрова, А. Н. Алешин, А. О. Белорус и др.] // Лабораторный практикум. — Санкт-Петербург : СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. — 248 с.
24. *Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы* / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. — М. : Физматлит, 2006. — 413 с.
25. *Форш Е. А.* Оптические, электрические и фотоэлектрические свойства нанокристаллического оксида индия: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2013. — 21 с.
26. *Hagleitner D. R.* Bulk and surface characterization of In₂O₃ (001) single crystals // Phys. Rev. B. Amer. Phys. Soc. — 2012. — **85**, No. 11. — P. 115441—115448.
27. *Marezio M.* Refinement of the crystal structure of In₂O₃ at two wavelengths // Acta Crystallogr. — 1966. — **20**, No. 6. — P. 723—728.
28. *Karazhanov S. Z.* Phase stability, electronic structure, and optical properties of indium oxide polytypes // Phys. Rev. B. Amer. Phys. Soc. — 2007. — **76**, No. 7. — P. 75129—75133.
29. *Ágoston P.* Ab initio modeling of diffusion in indium oxide / P. Ágoston, K. Albe // Ibid. — 2010. — **81**, No. 19. — P. 195—205.

30. Wang C. Y. Phase stabilization and phonon properties of single crystalline rhombohedral indium oxide // *Cryst. Growth Des.* — 2008. — **8**, No. 4. — P. 1257—1260.
31. Fuchs F. Indium-oxide polymorphs from first principles: quasiparticle electronic states / F. Fuchs, F. Bechstedt // *Phys. Rev. B. Amer. Phys. Soc.* — 2008. — **77**, No. 15. — P. 155107—155112.
32. Ильин А. С. Влияние освещения и поверхностного покрытия нанокристаллов на электронные процессы в нанокристаллическом оксиде индия: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2018. — 110 с.
33. Максимова О. В. Влияние легирования и условий осаждения на локализацию и перенос электронов в тонких плёнках оксида цинка и оксида индия: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2015. — 132 с.
34. Von Wenckstern H. Growth, physical properties and devices // *Adv. Electron. Mater.* — 2017. — **3**, No. 9. — P. 1—43.
35. Brewer S. H. Calculation of the electronic and optical properties of indium tin oxide by density functional theory / S. H. Brewer, S. Franzen // *Chem. Phys.* — 2004. — **300**, No. 1—3. — P. 285—293.
36. Cantalini C. NO₂ response of In₂O₃ thin film gas sensors prepared by sol-gel and vacuum thermal evaporation techniques // *Sensors Actuators B Chem.* — 2000. — **65**, No. 1—3. — P. 101—104.
37. Flores-Mendoza M. A. Influence of the annealing temperature on the properties of undoped indium oxide thin films obtained by the sol-gel method // *Thin Solid Films.* — 2008. — **517**, No. 2. — P. 681—685.
38. Epifani M. Nanocrystals as very active interfaces: ultrasensitive room-temperature ozone sensors with In₂O₃ nanocrystals prepared by a low-temperature sol-gel process in a coordinating environment // *J. Phys. Chem. C.* — 2007. — **111**, No. 37. — P. 13967—13971.
39. Palomares-Sanchez S. A. Sol-gel growth and characterization of In₂O₃ thin films // *Thin Solid Films. Elsevier.* — 2018. — **645**, No. 19. — P. 383—390.
40. Li N. Effects of oxygen vacancies on the electrochemical performance of tin oxide / [N. Li, K. Du, G. Liu et al.] // *J. Mater. Chem. A.* — 2013. — **1**. — P. 1536—1539.
41. Haruta M. Gold catalysts prepared by coprecipitation for low-temperature oxidation of hydrogen and of carbon monoxide / [M. Haruta, N. Yamada, T. Kobayashi et al.] // *J. Catal.* — 1989. — **115**. — P. 301—309.
42. Ahn C. H. Electric field effect in correlated oxide systems / C. H. Ahn, J.-M. Triscone, J. Mannhart // *Nature.* — 2004. — **424**. — P. 1015—1018.
43. Heller A. Chemistry and applications of photocatalytic oxidation of thin organic films // *Acc. Chem. Res.* — 1995. — **28**, No. 12. — P. 503—508.
44. Жилова О. В. Влияние структуры на электрические свойства систем In₂O₃—ZnO, In₂O₃—SnO₂, In₂O₃—Co₄₀Fe₄₀B₂₀—SiO₂: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Воронеж, 2016. — 18 с.
45. Lany S. Dopability, intrinsic conductivity, and nonstoichiometry of transparent conducting oxides / S. Lany, A. Zunger // *Phys. Rev. Lett. Amer. Phys. Soc.* — 2007. — **98**, No. 4. — P. 45501—45508.
46. Limpijumnong S. Hydrogen doping in indium oxide: An ab initio study // *Phys. Rev. B.* — 2009. — **80**, No. 19. — P. 193202—193210.

47. *Ágoston P.* Intrinsic *n*-type behavior in transparent conducting oxides: a comparative hybrid—functional study of In₂O₃, SnO₂ and ZnO // *Phys. Rev. Lett.* — 2009. — **103**, No. 24. — P. 245501—245507.
48. *Varley J. B.* Hydrogenated cation vacancies in semiconducting oxides // *J. Phys. Condens. Matter.* — 2011. — **23**, No. 33. — P. 334212—334218.
49. *Walsh A.* Surface oxygen vacancy origin of electron accumulation in indium oxide // *Appl. Phys. Lett.* — 2011. — **98**, No. 26. — P. 261910—261915.
50. *Korhonen E.* Compensating vacancy defects in Sn- and Mg-doped In₂O₃ // *Phys. Rev. B.* — 2014. — **90**, No. 24. — P. 245307—245311.
51. *Химическая энциклопедия*: в 5 т. — М. : Научное изд-во “Большая советская энциклопедия”, 1990. — Т. 2. — 671 с.
52. *Лидин Р. А.* Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов, 3-е изд., испр. — М. : Химия, 2000. — 480 с.
53. *Никольский Б. П.* Справочник химика, 2-е изд., испр. — М. - Л. : Химия, 1966. — Т. 1. — 1072 с.
54. *Никольский Б. П.* Справочник химика, 3-е изд., испр. — Л. : Химия, 1971. — Т. 2. — 1168 с.
55. *Рипан Р.* Неорганическая химия. Химия металлов / Р. Рипан, И. Четяну. — М. : Мир, 1971. — Т. 1. — 561 с.
56. *Чопра К.* Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас. — М. : Мир, 1986. — 435 с.
57. *Fraser D. B.* Highly conductive, transparent films of sputtered In₂O₃ / D. B. Fraser, H. D. Cook // *J. Electrochem. Soc.* — 1972. — **119**, No. 10. — P. 1368—1374.
58. *Thornton J. A.* Transparent conductive Sn—doped indium oxide coatings deposited by reactive sputtering with a post cathode / J. A. Thornton, V. L. Hedgcoth // *J. Vac. Technol.* — 1976. — **13**. — P. 117—121.
59. *Manifacier J. C.* In₂O₃:(Sn) and SnO₂:(F) films — Application to solar energy conversion; part 1 — Preparation and characterization / [J. C. Manifacier, L. Szepessy, J. F. Bresse, M. Perotin, R. Stuck] // *Mat. Res. Bult.* — 1979. — **14** (1). — P. 109—119.
60. *Kostlin H.* Optical and electrical properties of doped In₂O₃ films / H. Kostlin, R. Jost, W. Lerner // *Phys. Stat. Sol (a).* — 1975. — **29**. — P. 87—94.
61. *Lehmann H. W.* Preparation and properties of reactively co-sputtered transparent conducting films / H. W. Lehmann, R. Widmer // *Thin Solid Films.* — 1975. — **27** (2). — P. 359—368.
62. *Bosnell J. R.* On the structure of indium oxide-tin oxide transparent conducting films by electron diffraction and electron spectroscopy / J. R. Bosnell, R. Waghorno // *Ibid.* — 1973. — **15**. — P. 141—148.
63. *Haines W. G.* Effects of heat treatment on the optical and electrical properties of indium—tin oxide films / W. G. Haines, R. H. Bube // *J. Appl. Phys.* — 1978. — **49**. — P. 304—307.
64. *Morris J. E.* Temperature dependence of Hall mobility in indium—tin oxide thin films / M. I. Ridge, C. A. Bishop, R. P. Howson // *Ibid.* — 1980. — **51**. — P. 1847—1849.

65. *Steckl A. S.* The effect of ambient atmosphere in the annealing of indium tin oxide films / A. S. Steckl, G. Mohamed // *J. Appl. Phys.* — 1980. — **51**. — P. 3890—3895.
66. *Weiher R. L.* Optical Properties of Indium Oxide / R. L. Weiher, R. P. Ley // *Ibid.* — 1966. — **37**. — P. 299—301.
67. *Ohhata Y.* Optical properties of r. f. reactive sputtered tin—doped In_2O_3 films / Y. Ohhata, F. Shinoki, S. Yoshida // *Thin Solid Films.* — 1979. — **59**. — P. 255—261.
68. *A. с. 1058942 СССР.* Способ получения керамических изделий на основе оксида индия / А. Е. Соловьев, Р. Р. Швангирадзе, В. А. Жданов. — Оpubл. 07.12.83. Бюл. № 45.
69. *Плоткин С. С.* Электропроводность окислов индия и галлия // *Изв. АН СССР. Неорган. материалы*. — 1974. — **10**, № 6. — 933 с.
70. *A. с. 384800 СССР.* Электропроводный керамический материал / Ф. А. Акопов, Ю. Д. Новов, Е. Е. Подклетнов. — Оpubл. 30.09.83. Бюл. № 32.
71. *Ховив А. М.* Синтез и оптические свойства нанокристаллических пленок In_2O_3 , осажденных методом магнетронного реактивного распыления / [А. М. Ховив, Н. Н. Афонин, В. А. Логачева и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы.* — 2014. — **16**, № 3. — С. 361—366.
72. *Walsh A.* Nature of the band gap of In_2O_3 revealed by first—principles calculations and x-ray spectroscopy / [A. Walsh, J. L. F. DaSilva, S. H. Wei et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — **100**. — P. 167402—1.
73. *Girtan M.* The influence of post-annealing treatment on the electrical properties of In_2O_3 thin films prepared by an ultrasonic spray CVD process // *Surf. Coat. Technol.* — 2004. — **184**, No. 2—3. — P. 219—224.
74. *Granqvist C. G.* Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // *Sol. Energy Mater. and Solar Cells.* — 2007. — **91**. — P. 1529—1598.
75. *Суздальев И. П.* Физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — М.: КомКнига, 2006. — 592 с.
76. *Kathan N. Abdullah.* optical properties of indium oxide thin films deposited by thermal evaporation // *Tikrit J. of Pure Sci.* — 2010. — **15**, No. 1. — P. 260—265.
77. *Adurodija F. O.* High—quality indium oxide films at low substrate temperature / [F. O. Adurodija, H. Izumi, T. Ishihara et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 1999. — **74**. — P. 3059—3061.
78. *Moses E. R.* // Growth mechanism and optoelectronic properties of nanocrystalline In_2O_3 films prepared by chemical spray pyrolysis of metal—organic precursor / [Ezhil Raj Moses, A. Lalithambika, K. C. Vidhya et al.] // *Phys. B: Condensed Matter.* — 2008. — **403**. — P. 444—454.
79. *Kiriakidis G.* Photon sensitive high index metal oxide films / G. Kiriakidis, N. Katsarakis // *Ibid.* — 2004. — **16**. — P. S3757—S3768.
80. *Крылов П. Н.* Оптические свойства пленок ИТО, полученных высокочастотным магнетронным напылением с сопутствующей ионной обработкой / П. Н. Крылов, Р. М. Закирова, И. В. Федотова // *Физика и техника полупроводников.* — 2013. — **47**, вып. 10. — С. 57—72.

81. *Girtan M.* Structural and optical properties of indium oxide thin films prepared by an ultrasonic spray CVD process / M. Girtan, G. Folcher // *Surf. Coat. Technol.* — 2003. — **172**, No. 2—3. — P. 242—250.
82. *Pramod N. G.* Structural, optical and methanol sensing properties of sprayed In_2O_3 nanoparticle thin films / N. G. Pramod, S. N. Pandey, P. P. Sahay // *Ceram. Int.* — 2012. — **38**, No. 5. — P. 4151—4158.
83. *Francioso L.* Nanostructured In_2O_3 — SnO_2 sol-gel thin film as material for NO_2 detection / [L. Francioso, A. Forleo, S. Capone et al.] // *Sens. Actuators, B: Chemical.* — 2006. — **114**, No. 2. — P. 646—655.
84. *Kazuhiro Kato.* Changes in electrical and structural properties of indium oxide thin films through post—deposition annealing / [Kato Kazuhiro, Hideo Omoto, Takao Tomioka et al.] // *Thin Solid Films.* — 2011. — **520**, No. 1. — P. 110—116.
85. *Патрушева Т. Н.* Энергосберегающее и электрохромное стекло, полученное экстракционно-пиролитическим методом / Т. Н. Патрушева, А. Л. Белоусов // *Международ. журн. эксп. образования.* — 2016. — № 12—2. — С. 238—239.
86. *Минибаев Р. Ф.* Особенности электронного строения и поверхностных свойств полупроводниковых наноструктур для фотоники: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2010. — 25 с.
87. *Маркова Н. П.* Получение нанонитей оксида индия—цинка и исследование их фоточувствительности к ультрафиолетовому излучению / [Н. П. Маркова, О. Я. Березина, А. Л. Пергамент и др.] // *Труды Петрозаводского гос. ун-та.* — Петрозаводск, 2016. — С. 37—39.
88. *Özgür Ü.* A comprehensive review of ZnO materials and devices / [Ü. Özgür, Y. I. Alilov, C. Liu et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2005. — **98**. — P. 041301-1-103.
89. *Jaffe J. E.* LDA and GGA calculations for high—pressure phase transitions in ZnO and MgO / [J. E. Jaffe, J. A. Snyder, Z. Linand, A. C. Hess] // *Phys. Rev. B.* — 2004. — **62**. — P. 1660—1665.
90. *Гончар Л. И.* Влияние стехиометрии оптически прозрачных проводящих пленок оксидов индия и олова на их электрофизические и оптические свойства: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Ульяновск, 1998. — 21 с.

Надійшла 12.11.19

Grigorenko M., Chernigovtsev E.

Properties, structure, methods of obtaining of the indium oxide based materials and their practical use in the semiconductor and electronic technique (Review)

Review of literary data concerning general properties and structure of indium oxide (In_2O_3) and the analysis of methods of obtaining of the indium oxide based materials is presented and their use in different fields of electronic technique is examined.

Keywords: *indium oxide, semiconductor, transparent conducting layers, microelectronic device, physical properties.*