

І.І. Штеплюк, Г.В. Лашкар'ов, В.Й. Лазоренко, А.І. Євтушенко

Технологічні та матеріалознавчі аспекти створення світлодіодів на основі ZnO (Огляд)

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, 03680, Київ-142, Україна
Тел. +38 044 424 15 24, Факс +38 044 424 21 31, E-mail: iis87@i.ua*

ZnO привертає значну увагу завдяки своїм економічним, екологічним та технологічним перевагам перед GaN і завдяки можливим застосуванням для створення світловипромінюючих пристроїв. В цій статті представлено огляд останніх досягнень в дослідженнях оксиду цинку для можливих застосувань в області оптоелектроніки. Акцентовано увагу на пошуку шляхів розв'язання проблеми отримання тонких плівок р-типу ZnO, а також проведено аналіз вже існуючих світлодіодних структур на основі ZnO.

Ключові слова: плівки р-ZnO, світловипромінюючі пристрої, активатори свічення.

Стаття постуила до редакції 22.06.2009; прийнята до друку 15.03.2015.

Зміст

Вступ

1. Структурні та електронні властивості ZnO
2. ZnO n-типу
3. ZnO p-типу
4. Легування активаторами видимого світіння Cu і Ag
5. Тверді розчини ZnO-CdO
6. Прототипи світловипромінюючих пристроїв на основі оксиду цинку

Висновки

Література

Вступ

Зростаюча потреба в твердотільних джерелах і детекторах випромінювання в синій і ультрафіолетовій (УФ) областях спектру стимулювала в останні роки інтенсивне дослідження деяких широкозонних напівпровідників. Основні зусилля розробок в цих напрямках сконцентровані навколо GaN (ширина забороненої зони $E_g = 3,5$ eV), ZnO (3,4 eV) і ZnSe (2,9 eV), 6H-SiC (3 eV). Вражаючий прогрес досягнуто в матеріалах на основі GaN. На базі GaN і його твердих розчинів створені світловипромінюючі і лазерні діоди у синій області спектра (460 нм) [1,2]. Однак для ефективного випромінювання є необхідним високий вміст In, в InGaN, що зменшує E_g та робить проблематичним використання матеріалів на базі GaN для створення УФ світлодіодів і лазерних діодів

[3]. Оскільки запаси індію є вичерпними (світові запаси індію – $6 \cdot 10^3$ т) і цей матеріал досить дорогий (вартість індію – 700 \$ за 1кг), то постає проблема пошуку альтернативного матеріалу. В якості такого матеріалу вже давно розглядається оксид цинку. Світові запаси цинку складають $4,5 \cdot 10^{12}$ т, вартість – 1,1 \$ за 1кг. Оксид цинку, який володіє високою радіаційною, хімічною і термічною стійкістю, в перспективі може широко використовуватися при створенні різних пристроїв, зокрема в прозорій електроніці. Крім того, потрібно враховувати екологічну доцільність використання ZnO, оскільки він є біосумісним та нетоксичним. Завдяки поєднанню оптичних, електричних та п'єзоелектричних властивостей оксид цинку може знайти використання в газових сенсорах, пристроях генерації поверхневих акустичних хвиль, фотонних кристалах, фотодіодах [4]. ZnO вже використовується

для створення варисторів в промислових масштабах. Будучи прозорим в широкій області спектру, ZnO володіє високою стійкістю до опромінення, він піддається хімічному травленню і відносно дешевий, що робить його привабливим для використання в мікроелектроніці [5,6].

Крім того, ZnO має високе значення енергії зв'язку екситонів (60 меВ), що перевищує це значення для GaN в 3 рази. Такі наноструктури, як нанадотри і наноголки, є ефективними електронно-польовими емітерами. При умові розробки високоефективних люмінофорів на основі мікро- і наноструктурованого ZnO, цей матеріал має найбільші перспективи для створення повністю інтегрованого електронно-польового дисплея на його основі.

Для збільшення електронної провідності ZnO, його легують трьохвалентними донорними домішками (Ga, In, Al). Тверді розчини ZnO-MgO дозволяють суттєво збільшувати ширину забороненої зони (до ~ 5 еВ) і підвищувати енергію зв'язку екситонів, що робить такі матеріали перспективними для створення світловипромінюючих пристроїв в УФ-діапазоні. Легування оксидом кадмію зменшує ширину забороненої зони. Це може бути використано для створення кольорових світлодіодів. Нещодавно, з'явилися перші невдалі спроби отримання світлодіодів на основі оксиду цинку, легovanого донорними і акцепторними домішками [7]. Однак представлені в цій роботі діоди взагалі не світилися, хоча нелеговані плівки ZnO мають хорошу ультрафіолетову фотолюмінесценцію в області зв'язаних екситонів (370 нм) [8].

Незважаючи на великий потенціал ZnO в області електроніки, відомо лише декілька його застосувань, через складність отримання відтвореного р-типу ZnO. По суті, досягнення р-типу в плівках ZnO все ще залишається великою проблемою. Тому, відтвореність р-типу провідності в ZnO є виключно важливим питанням в цих областях досліджень [9]. Більшість спроб досягнути р-типу провідності зазнавали перешкод, внаслідок компенсаційного ефекту, створюваного великою фоновією концентрацією власних дефектів донорного типу та низькою розчинністю легуючої домішки [10-12]. Елементи V групи (N, As, P) є найбільш перспективними акцепторними домішками для широкозонних сполук $A^{II}B^{VI}$.

Вперше Park та ін. на прикладі ZnSe показали, що висока концентрація дірок в зразках р-типу може бути отримана при легуванні азотом [13]. Зростаючий інтерес до ZnO, обумовлений можливістю отримання ZnO р-типу за рахунок легування азотом [14-16], миш'яком [17, 18], фосфором [17,19]. Спеціально слід пригадати так званий метод подвійного легування, запропонований Yamamoto і Katayama-Yoshida [20]. Вони вперше теоретично і експериментально показали, що труднощі, пов'язані з впровадженням азоту, ймовірно, обумовлені великим значенням енергії Маделунга (для N ~ +0,97 еВ, для As ~ +12,6 еВ) [21].

У відповідності з їх результатами одночасне легування акцепторами (N, As, P) і донорами (Ga, Al, In) понижує енергію Маделунга за рахунок утворення в ZnO комплексів типу N-Ga-N, що сприяють зростанню розчинності N в ZnO, і як наслідок, утворенню мілких акцепторних рівнів. В роботах [22-24] показана можливість отримання р-типу ZnO термічним окисленням підкладок Zn_3N_2 в атмосфері O_2 при високих температурах. Отримані шари ZnO: N мають ефективну ультрафіолетову люмінесценцію, концентрацію дірок $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$ та рухливість $\sim 1-10 \text{cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$.

Методи вирощування плівок ZnO ще не є такими вдалимися як для нітриду галію та його твердих розчинів. Однак, методом молекулярно-пучкової епітаксії можна виростити плівки ZnO хорошої оптичної і структурної якості з концентрацією електронів 10^{17}cm^{-3} і рухливістю $150 \text{cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ [25]. Існує серія робіт про високоякісні тонкі плівки ZnO, вирощені методом імпульсного лазерного осадження та хімічного осадження з газової фази [26, 27]. В цій статті, ми представляємо властивості ZnO, а також огляд останніх досягнень в дослідженні ZnO. Акцентовано увагу на пошуку шляхів розв'язання проблеми отримання плівок р-типу ZnO, необхідних для створення світлодіодних структур.

I. Структурні та електронні властивості ZnO

ZnO кристалізується в трьох формах: гексагональній структурі вюртциту (рис. 1), кубічній структурі цинкової обманки (сфалерит) і рідше в

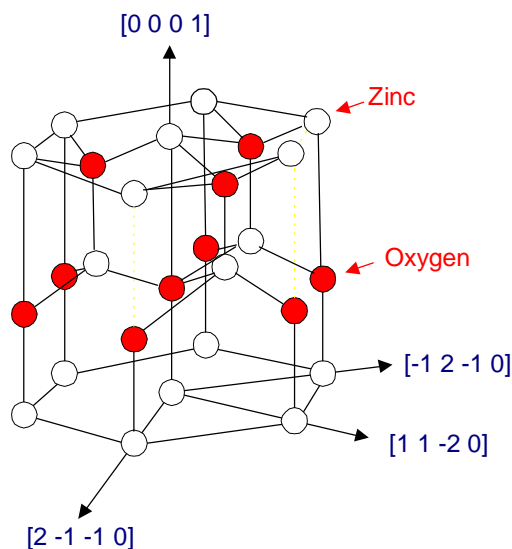


Рис. 1. Гексагональна структура вюртциту ZnO [28].

кубічній структурі кам'яної солі. Структура вюртциту є найбільш стабільною і тому найбільш поширена в умовах навколишнього середовища. Цинкова обманка може бути стабілізована при вирощуванні плівок ZnO на підкладках з кубічною

структурою ґратки. При цьому в обох випадках, один іон цинку тетраедрично оточений чотирма іонами кисню і навпаки. Структура кам'яної солі реалізується лише при відносно високих тисках ~ 10 ГПа. Ґратки ZnO в структурах вюртциту і сфалериту не мають інверсійної симетрії. Такі властивості ґраткової симетрії призводять до того, що в гексагональній і кубічній формі ZnO є п'єзоелектриком і до того, що в гексагональній формі ZnO є піроелектриком. Гексагональна структура має точкову групу симетрії $6mm$ або C_{6v} , і просторову групу симетрії $R\bar{6}_3mc$ або C_{6v}^4 . Періоди ґратки складають $a = 3,25$ Å та $c = 5,20$ Å; а їхнє співвідношення $c/a \sim 1,60$ є близьким до ідеального значення для гексагональної комірки $c/a = 1.633$ [28]. Як і в більшості матеріалів $A^{II}B^{VI}$, зв'язок в ZnO є переважно іонним, що пояснює його високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

ZnO є напівпровідником n -типу провідності внаслідок природного відхилення від стехіометричного складу, що пов'язано з присутністю таких власних дефектів, як кисневі вакансії (V_O) і міжвузольний цинк (Zn_i). Нелегований ZnO характеризується дуже високою концентрацією електронів 10^{21} cm^{-3} [29]. Проте, все ще виникають суперечки чи Zn_i чи V_O є донорами. Look *та ін.* [31] запропонували ідею, що міжвузольний Zn_i частіше ніж кисневі вакансії V_O виступає в ZnO в якості донора з енергією іонізації близько 30-50 меВ. Було також висловлено думку, що провідність n -типу, нелегованих плівок ZnO, спричинена воднем (H), який може виступати в якості донора з енергією іонізації близько 30 меВ [30, 32-34]. Це припущення має деякий сенс, оскільки водень може легко дифундувати в ZnO у великих кількостях, внаслідок великого коефіцієнту дифузії. Теоретично доведено, що впроваджений водень може виступати в якості джерела електронів і поводити себе як мілкий донор в ZnO [35].

II. ZnO n -типу

Легування ZnO донорними домішками є відносно легким в порівнянні з легуванням акцепторами. Елементи III групи Al, Ga та In, в якості домішок, заміщуючих Zn і елементи VII групи Cl та I в якості домішок заміщення O можуть використовуватися як донори [36]. Легування Al, Ga та In виконувалося багатьма групами дослідників, і в результаті привело до створення високоякісних, високопровідних плівок ZnO n -типу [37-43]. Myong *та ін.* [37] вирощували плівки ZnO, леговані Al, методом MOCVD і отримали високопровідні плівки з мінімальним питомим опором $6.2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см. Ataev *та ін.* [38] повідомили про питомий опір $1.2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см для плівки ZnO, легованих Ga, вирощених методом CVD. Ко *та ін.* [42] також вдалося отримати плівки ZnO, леговані Ga, вирощені на підкладках GaN методом плазмової молекулярно-пучкової епітаксії. Таким чином, плівки ZnO n -типу успішно використовували в різних приладах, в якості n -типу шарів в

світловипромінюючих діодах, а також як прозорі омичні контакти. Kim *та ін.* досліджували

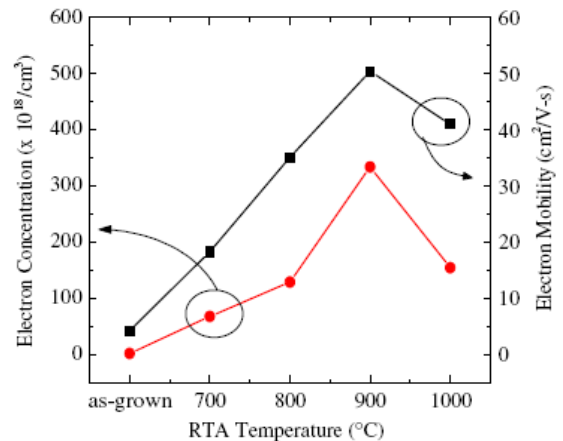


Рис. 2. Залежність електронної концентрації та рухливості від температури відпалу для зразків ZnO:Al/Al₂O₃, що були вирощені, методом магнетронного розпилювання при 600 °C і ВЧ потужності 100Вт з співвідношенням парціальних тисків $P_{Ar}/P_{O_2} = 1$ [43].

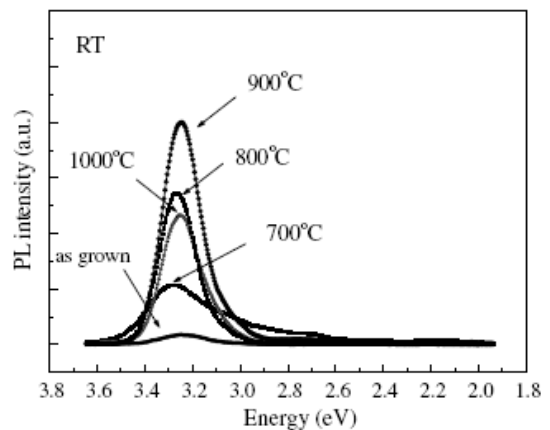


Рис. 3. Залежність спектрів фотолюмінесценції від температури відпалу для зразків ZnO:Al/Al₂O₃, що були вирощені, методом магнетронного розпилювання при 600 °C і 100 Вт з газовим співвідношенням рівним 1 [43].

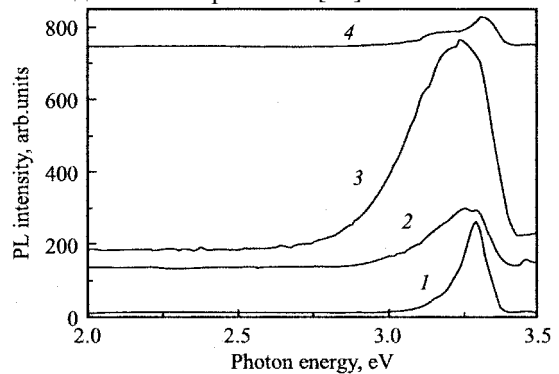


Рис. 4. Спектри фотолюмінесценції нелегованої плівки ZnO (1) і легованих плівок ZnO: Ag при $T = 80$ K і концентраціях домішки, ат%: 2 – 1, 3 – 3, 4 – 5 [49].

формування високоякісних шарів n-типу ZnO, легованих Al, на підкладках сапфіру (0001) методом ВЧ магнетронного розпилювання в поєднанні з методом швидкого термічного відпалу [43]. Було показано, що відпал зразків при 900 °С протягом 3 хвилин в атмосфері азоту призводить до електронної рухливості $65,6 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ і концентрації носіїв $1,83 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Рис. 2 показує залежність електронної концентрації та рухливості від температури відпалу для зразків, що були вирощені магнетронним методом при ВЧ потужності 100 Вт співвідношенням тисків газів Ar/O_2 , яке складало 1. Було показано, що при підвищенні температури відпалу, як електронна концентрація так і рухливість зростає, досягаючи максимуму при 900 °С, а потім зменшувалися. Також було виявлено, що відпал зразків при 900 °С призводить до найкращих електричних властивостей. Крім того, вважається, що електричні властивості погіршуються внаслідок дифузії домішки або розкладу плівки під час відпалу при температурах вище 900 °С. Рис. 3 показує залежність спектрів УФ фотолюмінесценції від температури відпалу, для зразків, які були вирощені при співвідношенні тисків газів 1. Щойно вирощений зразок показує досить слабкий пік фотолюмінесценції. Однак, при підвищенні температури відпалу до 900 °С, інтенсивність фотолюмінесценції істотно зростає, що корелює з подібною залежністю для $n(T)$ і $\mu(T)$.

Слід зазначити, що незалежно від умов вирощування, відпал зразків при 900 °С завжди призводить до зростання інтенсивності піків фотолюмінесценції. Подальше зростання температури до 1000 °С призводить до зменшення інтенсивності фотолюмінесценції. Однак, емісія глибокого рівня не спостерігається в спектрах фотолюмінесценції для зразка, відпаленого при 1000 °С.

III. ZnO р-типу

Розробка багатьох оптоелектронних і спінтронних пристроїв, які використовують р-п-гомоперехід на базі ZnO, може бути реалізована при умові створення надійної технології як n-, так і р-типу плівок ZnO. Однак, складність створення р-типу поки що перешкоджає розробці таких пристроїв. В природному стані ZnO знаходиться як напівпровідник n-типу, внаслідок великої кількості власних донорних дефектів, таких як вакансії кисню (V_{O}), міжвузольного цинку (Zn_i) та дефектів заміщення кисню цинком (Zn_{O}). Тому дуже важко створити неглибокі акцепторні рівні, внаслідок того, що ці акцептори можуть бути скомпенсованими рядом власних дефектів, а також домішкою водню, внаслідок чого формуються пастки глибоких донорних рівнів [44]. Крім того, низька розчинність і велика енергія іонізації акцепторів приводять до низької концентрації носіїв, що створює великі труднощі для отримання плівок ZnO р-типу. Легування ZnO для отримання р-типу може бути

реалізовано заміщенням вузлів кисню в ґратці елементами V групи (N, P, As і Sb) або заміщенням елементами I групи (H, Li, Na) вузлів цинку [44]. Серед цих акцепторів найбільш підходящим легуючим елементом є азот внаслідок близькості іонних радіусів з киснем. Проте, хоча значні зусилля і були спрямовані на створення плівок р – ZnO, легованих азотом і основаних на ZnO р–п діодів, в ZnO: N ще не досягнуто відтвореної і хорошої якості р-типу провідності.

Одним із шляхів для досягнення хорошої розчинності азоту в ZnO є спільне легування, в якому використовують акцептори і неактивні донори одночасно [44]. Існує декілька повідомлень про вирощування плівок ZnO р-типу методом одночасного легування з використанням різних методів осадження і легування азотом і галієм (N-Ga) [45], азотом і алюмінієм (N-Al) [46], азотом і індієм (N-In) [47].

IV. Легування активаторами видимого світіння Cu і Ag

В роботі [48] було досліджено вплив домішок міді, срібла і золота на свічення плівок оксиду цинку, осаджених методом магнетронного напилення. Було виявлено переважання зеленого світіння донорно-акцепторних пар, в яких донорами були власні дефекти – вакансії кисню, а акцепторами – впроваджені домішки. Були також визначені глибини залегання відповідних акцепторних рівнів по відношенню до валентної зони. При цьому виявилось, що мідь і срібло дають найбільш мілкі рівні з енергіями зв'язку станів $3d^{10}$: 380 і 200 меВ, відповідно. Автори вказували на ще меншу енергію зв'язку цих акцепторів в стані $3d^9$, характерному для ізолюючих плівок оксиду цинку. Однак метод магнетронного напилення не дозволив отримати плівки з малою концентрацією електронів і хорошою кристалічністю. В роботі [49] досліджувався вплив легування ZnO акцепторними домішками першої групи – міддю і сріблом, з різними концентраціями – на провідність, фоточутливість і люмінесцентні властивості матеріалу. Використовувався метод електронно-пучкового випаровування з регулюванням складу іонної компоненти в процесі напилення, який не потребував наступного високотемпературного відпалу плівок, при якому втрачається кисень [50]. В результаті легування плівок оксиду цинку домішками срібла і міді з високою концентрацією від 1 до 5 ат% вдалося отримати високоомні шари з високою люмінесценцією у видимій (ZnO: Ag (рис. 4.)) і ультрафіолетовій (ZnO: Cu (рис. 5.)) областях спектру. За рахунок збагачення киснем в процесі росту і домішкового легування спектри фотолюмінесценції плівок склалися із ліній крайового і екситонного свічення в фіолетовій частині спектру.

Аналіз спектрів фотолюмінесценції і

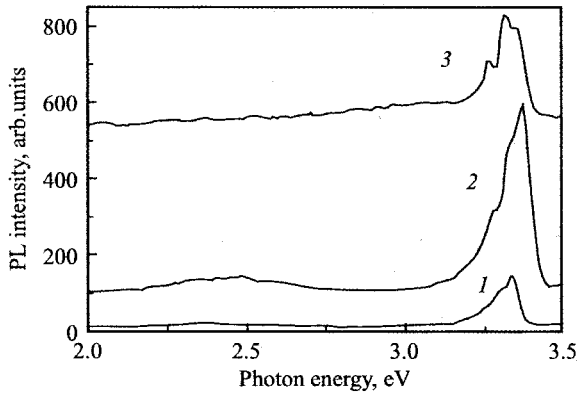


Рис. 5. Спектри фотолумінесценції легованих плівок ZnO: Cu при $T=80$ К і концентраціях домішки, ат%: 1 – 1, 2 – 3, 3 – 5 [49].

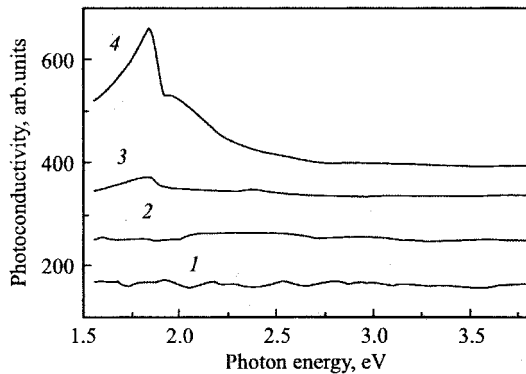


Рис. 6. Спектри фотопровідності нелегованих плівок ZnO (1) і легованих плівок ZnO: Ag при $T=300$ К і концентраціях домішки, ат%: 2 – 1, 3 – 3, 4 – 5 [49].

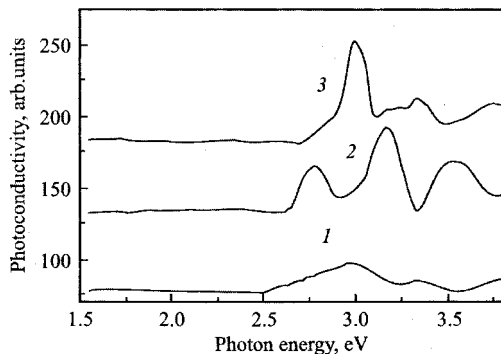


Рис. 7. Спектри фотопровідності легованих плівок ZnO: Cu при $T=300$ К і концентраціях домішки, ат%: 1 – 1, 2 – 3, 3 – 5 [49].

фотопровідності (рис. 6-7) дозволив авторам зробити висновок про різні механізми впровадження вказаних вище домішок. Якщо атоми міді впроваджуються у вигляді точкових дефектів трьох типів: акцепторів Cu_{Zn} в двох зарядових станах ($3d^{10}$ і $3d^9$), а також донорів Cu_i , то атоми срібла впроваджуються лише у вигляді дефектів заміщення Ag_{Zn} в одному зарядовому стані ($3d^{10}$).

Впровадження міді і срібла в оксид цинку істотно підвищує питомий опір і фоточутливість плівок. Це говорить про те, що при заміщенні атомів цинку в кристалічній ґратці вказані домішки

являються ефективними акцепторами. При цьому мідь дає більший питомий опір в порівнянні з сріблом. Однак існує проблема впровадження міді саме у вигляді дефектів заміщення – акцепторів Cu_{Zn} , а не у вигляді міжвузольних дефектів – донорів Cu_i . При великій концентрації домішки міді вона починає компенсувати саму себе, утворюючи точкові дефекти донорного і акцепторного типу.

Таку істотну відмінність в поведінці домішок міді і срібла в ZnO можна пояснити різницею їх іонних радіусів: Cu^+ – 0,098 нм, Cu^{2+} – 0,080 нм, Ag^+ – 0,113 нм [51]. Одновалентний стан срібла обумовлює переважання дефектів одного типу Ag_{Zn} ($3d^{10}$). Набагато більший радіус іона срібла по відношенню до іона цинку Zn^{2+} (0,083 нм) перешкоджає його вихід в міжвузля і викликає напруження в кристалічній ґратці оксиду цинку, які компенсуються виділенням другої фази.

V. Тверді розчини ZnO-CdO

Зростаючі потреби в більшій ефективності роботи світловипромінюючих пристроїв та в зменшенні їх вартості спрямовують на пошук нових оптоелектронних матеріалів, альтернативних до нітридів Al, Ga, In та їх твердих розчинів. Тверді розчини напівпровідникових сполук значно розширюють функціональні можливості приладів та елементів, виготовлених на їх основі. Тому вивчення фізичних властивостей малодосліджених твердих розчинів є актуальним як для матеріалознавства, так і для приладобудування. Одним з таких альтернативних матеріалів є $Zn_{1-x}Cd_xO$.

Додавання до ZnO ізоелектронного компоненту дозволяє створити твердий розчин, з можливістю керування шириною забороненої зони. Найпридатнішим компонентом для зменшення є Cd. Універсальність оптоелектронних пристроїв на основі ZnO зростає, оскільки, є можливість контролювати енергію його світлової емісії. Тверді розчини $Zn_{1-x}Cd_xO$ характеризуються меншою шириною забороненої зони, порівняно з ZnO. Це може бути використано для створення кольорових світло діодів на між зонних переходах. Тому, актуальною є розробка ефективної технології створення матеріалів на основі твердих розчинів $Zn_{1-x}Cd_xO$, які в перспективі можуть використовуватися для виготовлення дешевих та екологічних пристроїв оптоелектроніки.

Переважаюча більшість сучасних публікацій, в яких вивчаються властивості $Zn_{1-x}Cd_xO$, присвячена дослідженню плівкового стану цього матеріалу для виготовлення багатощарових гетероструктур, придатних для створення світловипромінюючих пристроїв видимого діапазону випромінювання. В літературі повідомляється про численні методи вирощування твердих розчинів $Zn_{1-x}Cd_xO$, зокрема, золь-гель метод, спреїний піроліз, лазерна абляція, термічне випаровування, молекулярно-пучкова епітаксія. Однак якість приготвлених, за допомогою таких методів, плівок була незадовільною, внаслідок

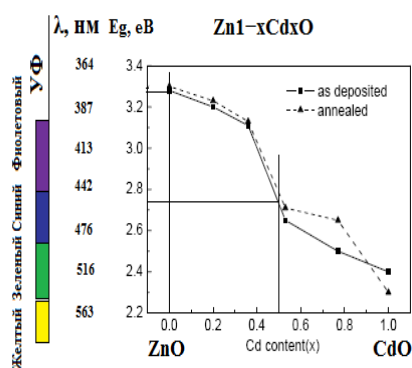


Рис. 8. Залежність енергії ширини забороненої зони від вмісту кадмію для щойно вирощених та відпалених плівок твердих розчинів $Zn_{1-x}Cd_xO$ [52].

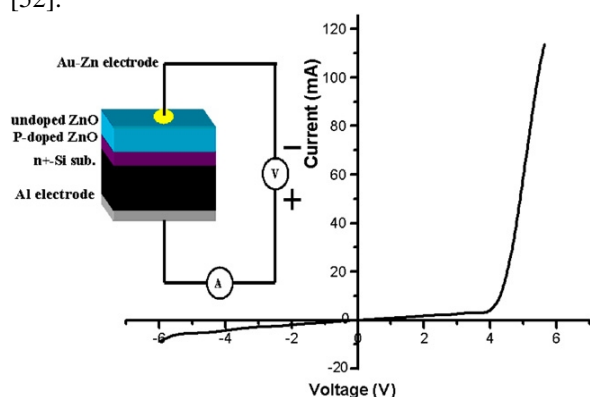


Рис. 9. Схема та вольт-амперна характеристика світловипромінюючого пристрою на основі ZnO [53].

співіснування багатофазного та полікристалічного стану. Згідно літературних даних, лише методом реактивного магнетронного осадження при постійному струмі були успішно вирощені плівки твердого розчину $Zn_{1-x}Cd_xO$ ($0 \leq x \leq 0,5$) [52]. На рис. 8 показано залежність ширини забороненої зони від вмісту кадмію для щойно вирощених та відпалених плівок. В межах існування твердого розчину очікується міжзонна випромінювальна рекомбінація в синьо-зеленій області спектру.

VI. Світловипромінюючі пристрої на основі оксиду цинку

Ще недавно світлодіоди були всього лише пристроями індикації, а сьогодні це вже високоефективні джерела світла, які в найближчий час перетворять світ штучного освітлення і замінять лампи розжарювання. В загальному світловипромінюючий діод (СВД) представляє собою $p-n$ перехід, контакт метал-напівпровідник, МДН або іншу діодну структуру, проходження струму через яку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням. Якщо генерація світла відбувається в результаті інжекції неосновних носіїв

заряду з їх наступною рекомбінацією, то СВД називається інжекційним. Інкєкційні випромінюючі діоди з гомо- або гетеро- $p-n$ переходом є найбільш поширеними. Крім інжекційних випромінюючих діодів можливе використання для генерації випромінювання передпробойної електролюмінесценції при зворотньому зміщенні діода. В достатньо сильному електричному полі зворотньо зміщеного $p-n$ переходу відбувається прискорення, ударна іонізація, і розмноження носіїв, які збуджують центри свічення в напівпровіднику.

Як відомо, далеко не всі напівпровідникові матеріали можуть використовуватися для створення світлодіодів. Перші спроби отримання світлодіодів на основі оксиду цинку, легованого донорними і акцепторними домішками, відносяться до початку 90-х. Однак більшість виготовлених діодів взагалі не випромінювали, хоча нелеговані структурно досконалі плівки ZnO звичайно мають хорошу ультрафіолетову фотолюмінесценцію в області зв'язаних екситонів. Тому необхідно вибирати легуючу домішку таким чином, щоб вона не тільки давала необхідну величину і тип провідності, але й не погіршувала спектр свічення і прозорість оксиду цинку.

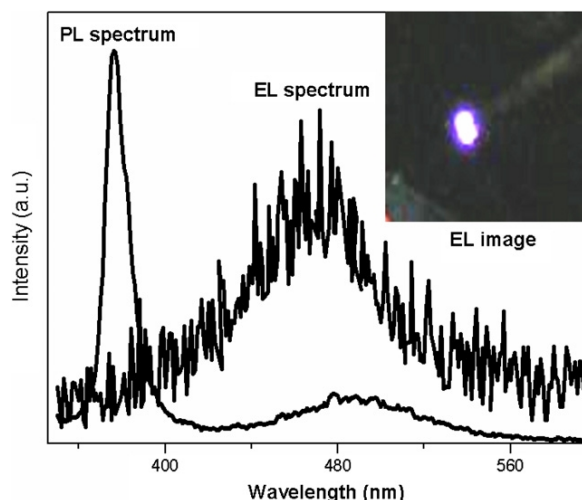


Рис. 10. ФЛ спектр, ЕЛ спектр і ЕЛ зображення світловипромінюючого пристрою ZnO. ЕЛ спектр і ЕЛ зображення були зроблені при прямому струмі 40 мА [53].

Liang та ін. [53] створили СВД на гомопереході $n - ZnO / p - ZnO:P$. У цій роботі тонка плівка ZnO була вирощена методом MOCVD на легованій фосфором підкладці $n^+ - Si$. При цьому дифундуючий фосфор був зосереджений на інтерфейсі плівки ZnO і Si. Схема і вольт-амперна характеристика цього світлодіода показані на рис.9. Спостерігається характерна випрямляюча ВАХ, і включення діоду відбувається при прямій напрузі зміщення 4.2 В і зворотній напрузі зміщення, дещо вище, ніж 6 В. Вимірювання електролюмінесценції виконувалися при кімнатній температурі. Спостерігалася синьо-біла яскрава дефектна електролюмінесценція при прямому зміщенні (рис. 10). Із спектру фотолюмінесценції плівки ZnO (рис. 10) видно що

сильна крайова емісія (NBE) при 376 нм супроводжується слабкою глибокорівневою емісією (DLE) при 480 нм. NBE емісія звичайно пов'язана з емісією зв'язаних екситонів, а DL емісія спричинена кисневими вакансіями або міжвузлями цинку. При цьому, порівнюючи електролюмінісцентний емісійний пік, розташований при 470 нм з спектром фотолюмінесценції, можна зробити висновок, що електролюмінісцентний пік, пов'язаний з дефектно-зв'язаною рекомбінацією. Крім того, ще однією можливою причиною, яка відповідальна за електролюмінесценцію є утворення переходу метал-діелектрик-напівпровідник, оскільки кремнієва підкладка легко окислюється під час процесу росту, утворюючи перехід ZnO/SiO₂/Si.

Sun та ін. [54] повідомили про створення СВД на основі наностержнів ZnO. Плівка р-типу ZnO, легована N-In була вирощена методом ультразвукового піролізу. Плівка n-типу ZnO, яка складалася з наностержнів, вирощена за допомогою низькотемпературного гідротермального методу. Вирощені плівки використовувалися для створення

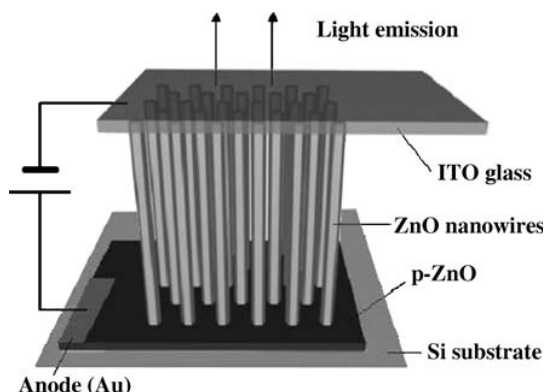


Рис. 11. Схема гомопереходу СВД структури p-ZnO плівка / ZnO наностержні [54].

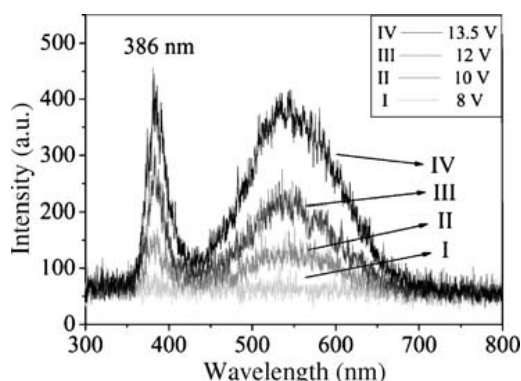


Рис. 12. Спектри електролюмінесценції СВД на гомопереході ZnO при кімнатній температурі та при різних прямих напругах [54].

діоду на гомопереході (рис.11). При прямих напругах, більших ніж 8 В, відбувається інжекція електронів і дірок, і внаслідок цього виникає випромінювальна рекомбінація. Як видно з рис. 12, типові спектри електролюмінесценції діодів показують УФ піки при 386 нм і широку зелену

полосу при 540 нм. УФ піки приписують екситонній рекомбінації, в той час як широку полосу зеленої емісії пов'язують з поверхневими станами і дефектами ZnO, наприклад кисневими вакансіями. Інтенсивності як УФ так і зеленої емісії зростають приблизно лінійно із струмом. Для зразка, який обговорюється в роботі [54], зелена електролюмінесценція була такою яскравою, що її можна було спостерігати неозброєним оком. Для того, щоб з'ясувати походження електролюмінесценції, автори [54] виконали фотолюмінісцентні вимірювання плівки p-ZnO, легованої N-In, і наностержнів ZnO. Виявилось, що фотолюмінесценція плівки p-ZnO була відсутньою; ні емісія при 385 нм, ні зелене випромінювання не були виявлені. Фотолюмінісцентні вимірювання наностержнів ZnO показали наявність сильної екситонної лінії (рис. 13). УФ емісія була досить

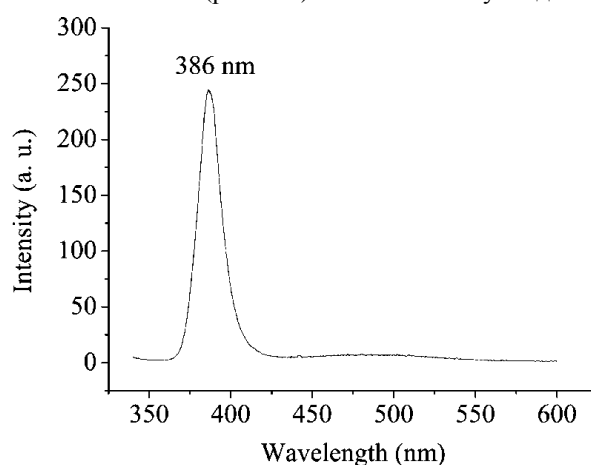


Рис. 13. Спектр фотолюмінесценції наностержнів ZnO, виміряний при кімнатній температурі [54].

сильною, і це вказувало на те, що наностержні ZnO мають високу ефективність УФ емісії. Порівнюючи фотолюмінісцентні і електролюмінісцентні спектри, автори зробили висновок, що електролюмінісцентна емісія була спричинена наностержнями ZnO.

Hwang і ін. [55] створили МДН діод на основі оксиду цинку з використанням діелектричного шару ZnO і шару n - ZnO, вирощених методом ВЧ магнетронного розпилювання. Вольт-амперна характеристика такого МДН діода показує випрямляючу поведінку, з пороговою напругою 8.9 В і зонно-крайову емісією (380 нм) при кімнатній температурі. Це електролюмінісцентне випромінювання ZnO автори пов'язують з процесом генерації дірок в діелектричному шарі ZnO при високій пороговій напрузі 8.9 В, внаслідок процесу ударної іонізації.

Група інших авторів, Jiao та ін. [56], повідомляють про створення світловипромінюючого діода на основі p-n переходу ZnO на підкладці a-Al₂O₃ методом молекулярно-пучкової епітаксії, підсиленої плазмою. Плазму NO використовували для вирощування шару ZnO p-типу. При цьому вольт-амперні вимірювання при низьких температурах показали типову діодну

Таблиця 1

Різні види світлодіодів, створених на основі оксиду цинку

Структура	Метод вирощування	Домішка	Емісія (нм)	Посилання
p-ZnO/n-ZnO sub.	Eximer laser doping	P	~380 (110K)	[57]
p-ZnO/n-ZnO	PLD	N	Blue-white	[58]
N ₂ O implanted ZnO/n-ZnO/Al ₂ O ₃	CVD	N	388	[59]
n-ZnO/u-ZnO/p-ZnO	MBE	N	430	[60]
p-ZnO/n-ZnO/ZnO sub.	MOCVD	N	384	[61]
p-ZnO/n-ZnO/ α -Al ₂ O ₃	Plasma-assisted MBE	N	430	[62]
p-ZnO/p-BeZnO/MQW/ n-BeZnO/n-ZnO	Hybrid beam deposition	As	360, 390, 550	[63]
p-ZnO/n-ZnO, p-ZnO/ MgZnO/ ZnO/ /MgZnO/n-ZnO	RF magnetron sputtering	P	380	[64]

характеристику з пороговою напругою близько 4.0 V при прямому зміщенні. Із зростанням температури, випрямляюча характеристика поступово деградувала, і зникла при кімнатній температурі. Електролюмінісцентна полоса ZnO *p-n* переходу СВД була розташована в синьо-фіолетовій області і істотно послаблялася при зростанні температури.

Важливим етапом при створенні СВД є вибір підкладки. Багато підкладок, таких як ScMgAlO, монокристалічний ZnO, сапфір, арсенід галію, кремній використовували для вирощування ZnO. Особливий інтерес викликає також вирішення проблем інтеграції ZnO з Si, що може відкрити можливості реального суміщення унікальних функціональних властивостей цих матеріалів при створенні фотоперетворювачів на кремнієвих підкладках.

Різні види світлодіодів на основі ZnO гомопереходів приведені в таблиці 1.

Висновки

Напівпровідники групи A^{II}-B^{VI} із структурою вюртциту, такі як ZnSe, ZnS та ZnO мають великі значення ширини забороненої зони. Тому, вони є найкращими кандидатами для синіх та ультрафіолетових світловипромінюючих діодів та лазерів. Однак, важко створювати *p-n* гомопереходи на основі цих матеріалів, внаслідок їхньої однополярності, тобто, *n*-типу напівпровідник генерується по своїй природі, і навпаки, *p*-типу напівпровідник досить складно реалізувати. Не дивлячись на це, ZnO є перспективним широкозонним напівпровідником, який характеризується можливістю досягнення високих концентрацій власних дефектів: кисневих вакансій і мужвузольних атомів цинку, надстехіометричного кисню (вакансій цинку), які забезпечують можливість зміни оптичних властивостей,

провідності і інтенсивне свічення в «зеленій», а також люмінесценцію в «червоній» області спектру. Таким чином, розвиток технології отримання кристалічних плівкових *p/n*-ZnO-структур з варійованою концентрацією власних дефектів є актуальною задачею при розробці ряду інтегрованих твердотільних оптоелектронних пристроїв з прогнозованими оптичними і електронними властивостями. В теперішній час прикладаються значні зусилля для того, щоб створити ZnO *p*-типу, в основному для світловипромінюючих діодів (СВД) та лазерних застосувань. Однак, існує дуже мала кількість повідомлень про реалізацію електролюмінісценції з гомопереходу світловипромінюючого діода на основі ZnO.

Незважаючи на той факт, що оксид цинку на цей час є найбільш досліджуваним в світі матеріалом, широкого промислового застосування в області оптоелектроніки він ще не знайшов. Панівну роль до цих пір відіграють нітриди. Тому враховуючи актуальність даного матеріалу і добре відомі переваги перед нітридними напівпровідниками, ZnO має досить привабливі перспективи, пов'язані з покращенням і оптимізацією технології вирощування тонких плівок, вдосконаленням методів легування, спрямованих, зокрема, на досягнення стабільного і відтворюваного *p*-типу провідності, а також розширенням вже існуючої експериментальної бази.

Штеплюк І.І. – аспірант Інституту проблем матеріалознавства НАН України;

Лашкар'ов Г.В. – професор, доктор фіз.-мат. наук, керівник відділу фізики та технології фотоелектронних та магнітоактивних матеріалів ІПМ НАНУ;

Лазоренко В.Й. – старший науковий співробітник ІПМ НАНУ,

Євтушенко А.І. – молодший науковий співробітник ІПМ НАНУ.

- [1] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Shizuo Fujita, Shigeo Fujita, S. Nakamura. Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm // *Appl. Phys. Lett.*, 70, 981 (1997).
- [2] T. Mukai, D. Morita, S. Nakamura. High-power UV InGaN/AlGaIn double-heterostructure LEDs // *J. Cryst. Growth*, 189, 778 (1998).
- [3] H. Tampo, A. Yamada, P. Fons, H. Shibata, K. Matsubara, K. Iwata, S. Niki, K. Nakahara, H. Takasu. Effects of low temperature buffer layer treatments on the growth of high quality ZnO films // *Appl. Phys. Lett.*, 84 (22), 4412 (2004).
- [4] Y. Chen, T. Yao. ZnO as a novel photonic material for the UV region // *Mater. Sci. Eng. B*, 75, 190 (2000).
- [5] D.C. Look. Recent advances in ZnO materials and devices // *Mater. Sci. Eng. B*, 80, 383 (2001).
- [6] D.C. Look, D.C. Reynolds, C.W. Litton, R.L. Jones, D.B. Eason, G. Cantwell. Characterization of homoepitaxial p-type ZnO grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.*, 81 (10), 1830 (2002).
- [7] X. Guo, H. Choi, H. Tabata, T. Kawai. Fabrication and Optoelectronic Properties of a Transparent ZnO Homostructural Light-Emitting Diode // *Jap. J. Appl. Phys.*, 40, L177 (2001).
- [8] S.B. Zhang, S.H. Wei, A. Zunger. Intrinsic n-type versus p-type doping asymmetry and the defect physics of ZnO // *Phys. Rev. B*, 63, 205 (2001).
- [9] K.K. Kim, H.S. Kim, D.K. Hwang, J.H. Lim and S.J. Park Realization of p-type ZnO thin films via phosphorus doping and thermal activation of the dopant // *Appl. Phys. Lett.*, 83, 63 (2003).
- [10] K. Minegishi, Y. Koiwai and K. Kikuchi Growth of p-type Zinc Oxide Films by Chemical Vapor Deposition // *Japan. J. Appl. Phys.*, 36, L1453 (1997).
- [11] Y. Sato and S. Sata *Thin Solid Films*, 281-282, 445 (1996).
- [12] Y. Kanai *Japan. J. Appl. Phys., Part 1*, 30, 703 (1991).
- [13] R.M. Park, M.B. Troffer, C.M. Rouleau, J.M. DePuydt, M.A. Haase. p-type ZnSe by nitrogen atom beam doping during molecular beam epitaxial growth // *Appl. Phys. Lett.*, 57, 2127 (1990).
- [14] H.W. Liang, Y.M. Lu, D.Z. Shen, Y.C. Liu, J.F. Yan, C.X. Shan, B.H. Li, Z.Z. Zhang, J.Y. Zhang, X.W. Fan. P-type ZnO thin films prepared by plasma molecular beam epitaxy using radical NO // *Phys. Status Solidi A*, 202, 1060 (2005).
- [15] J.W. Sun, Y.M. Lu, Y.C. Liu, D.Z. Shen, Z.Z. Zhang, B.H. Li, J.Y. Zhang, B. Yao, D.X. Zhao, X.W. Fan. The activation energy of the nitrogen acceptor in p-type ZnO film grown by plasma- assisted molecular beam epitaxy // *Sol. St. Commun.*, 140, 345 (2006).
- [16] И.В. Рогозин. Приготовление пленок ZnO:N методом радикало-лучевой геттерирующей эпитаксии // *ФТП*, 41 (8), 924 (2007).
- [17] V. Vaithianathan, Y.H. Lee, B.-T. Lee, S. Hishita, S.S. Kim. Doping of As, P and N in laser deposited ZnO films // *J. Cryst. Growth*, 287, 85 (2006).
- [18] M.B. Kotlyarevsky, I.V. Rogozin, A.V. Marakhovsky. Zinc Oxide — A Material for Micro- and Optoelectronic Applications // *Functional Mater.*, 12 (4), 616 (2005).
- [19] H. Tampo, H. Shibata, P. Fons, A. Yamada, K. Matsubara, K. Iwata, K. Tamura, H. Takasu, S. Niki. The effects of thermal treatments on the electrical properties of phosphorus doped ZnO layers grown by MBE // *J. Cryst. Growth*, 278, 268 (2005).
- [20] T. Yamamoto, H. Katayama-Yoshida. Solution Using a Codoping Method to Unipolarity for the Fabrication of p-Type ZnO // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, L166 (1999).
- [21] T. Yamamoto, H. Katayama-Yoshida. Physics and control of valence states in ZnO by codoping method // *Physica B*, 302-303, 155 (2001).
- [22] D. Wang, Y.C. Liu, R. Mu, J.Y. Zhang, Y.M. Lu, D.Z. Shen, X.W. Fan. The photoluminescence properties of ZnO:N films fabricated by thermally oxidizing Zn₃N₂ films using plasma-assisted metal-organic chemical vapour deposition // *J. Phys.: Condens. Matter*, 16, 4635 (2004).
- [23] E. Kamińska, A. Piotrowska, J. Kossut, R. Butkutė, W. Dobrowolski, R. Lukasiewicz, A. Barcz, R. Jakieda, E. Dynowska, E. Przeździecka, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, E. Kowalczyk. Transparent p-type ZnO films obtained by oxidation of sputter-deposited Zn₃N₂ // *Phys. Status Solidi C*, 2, 1119 (2005).
- [24] Y. Nakano, T. Morikawa, T. Ohwaki, Y. Taga. Electrical Characterization of p-Type N-Doped ZnO Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Zn₃N₂ Films // *Appl. Phys. Lett.*, 88, 172 103 (2006).
- [25] K. Ogata, K. Koike, T. Tanite, T. Komuro, F. Yan, S. Sasa, M. Inoue and M. Yano ZnO and ZnMgO growth on a-plane sapphire by molecular beam epitaxy // *J. Cryst. Growth*, 251, 623 (2003).
- [26] A.I. Khudobenko, A.N. Zherikhin, R.T. Williams, J. Wilkinson, K.B. Ucer, G. Xiong and V.V. Voronov Pulsed Laser Deposition of ZnO thin films on Silicon and Sapphire // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 5121, 317 (2003).
- [27] A.B. M.A. Ashrafi, B. Zhang, N.T. Binh, K. Wakatsuki and Y. Segawa High-Quality ZnO Layers Grown on 6H-SiC Substrates by Metalorganic Chemical Vapor Deposition // *Japan. J. Appl. Phys.*, Part 1 43, 1114 (2004).
- [28] Landolt-Bornstein, New Series, Group III, Vol. 17 B, 22, 41B (Ed.: U. Rossler), Springer, Heidelberg, (1999).

- [29] T. Minami, H. Sato, H. Nanto and S. Takata Group III Impurity Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by RF magnetron sputtering // *Japan. J. Appl. Phys., Part 2* 24, L781 (1985).
- [30] A. F. Kohan, G. Ceder, D. Morgan and C. G. Van de Walle First-principles study of native point defects in ZnO // *Phys. Rev. B*, 61, 15019 (2000).
- [31] D.C. Look, J. W. Hemsky and J. R. Sizelove Dislocation Scattering In GaN // *Phys. Rev. Lett.*, 82, 2552 (1999).
- [32] C.G. Van de Walle Defect analysis and engineering in ZnO // *Physica B*, 308-310, 899 (2001).
- [33] S.F.J. Cox Experimental confirmation of the predicted shallow donor hydrogen state in zinc oxide // *Phys. Rev. Lett.* 86, 2601 (2001).
- [34] Y.M. Strzhemechny. Remote hydrogen plasma doping of single crystal ZnO // *Appl. Phys. Lett.*, 84, 2545 (2004).
- [35] C.G. Van de Walle Hydrogen as a cause of doping in ZnO // *Phys. Rev. Lett.*, 85, 1012 (2000).
- [36] H. Kato, M. Sano, K. Miyamoto and T. Yao Growth and characterization of Ga-doped ZnO layers on a-plane sapphire substrates grown by molecular beam epitaxy // *J. Cryst. Growth*, 237-239, 538 (2002).
- [37] S.Y. Myong, S. J. Baik, C. H. Lee, W. Y. Cho and K. S. Lim Extremely Transparent and conductive ZnO:Al thin films prepared by photo-assisted metalorganic chemical vapor deposition (photo-MOCVD) using AlCl₃(6H₂O) as new doping material // *Japan. J. Appl. Phys., Part 2*, 36, L1078 (1997).
- [38] B.M. Ataev, A.M. Bagamadova, A.M. Djabrailov, V.V. Mamedo and R.A. Rabadanov Highly conductive and transparent Ga-doped epitaxial ZnO films on sapphire by CVD // *Thin Solid Films*, 260, 19 (1995).
- [39] V. Assuncao, E. Fortunato, A. Marques, H. Aguas, I. Ferreira, M. E. V. Costa and R. Martins Influence of the deposition pressure on the properties of transparent and conductive ZnO:Ga thin-film produced by r.f. sputtering at room temperature // *Thin Solid Films*, 427, 401 (2003).
- [40] Z.F. Liu, F.K. Shan, Y.X. Li, B.C. Shin and Y.S. Yu Epitaxial growth and properties of Ga-doped ZnO films grown by pulsed laser deposition // *J. Cryst. Growth*, 259, 130 (2003).
- [41] M. Chen, Z. Pei, W. Xi, C. Sun and L. Wen *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 666 F.1.2 (2001).
- [42] H.J. Ko, Y. F. Chen, S. K. Hong, H. Wenisch, T. Yao and D. C. Look Ga-doped ZnO films grown on GaN templates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.*, 77, 3761 (2000).
- [43] T. Minami, H. Nanto and S. Takata Highly conductive and transparent aluminum doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering // *Japan. J. Appl. Phys., Part 2*, 23, L280 (1984).
- [44] H. Kim, A. Cepler, M. S. Osofsky, R. C Y. Auyeung, and A. Pique Fabrication of Zr-N codoped p-type ZnO thin films by pulsed laser deposition // *Appl. Phys. Lett.* 90, 203508 (2007).
- [45] Kumar, T.-H. Kim, S.-S. Kim, and B.-T. Lee. Growth of epitaxial p-type ZnO thin films by codoping of Ga and N, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112103 (2006).
- [46] G.D. Yuan, Z.Z. Ye, L.P. Zhu, Q. Qian, B.H. Zhao, R.X. Fan. C.L. Perkins, and S.B. Zhang. Control of conduction type in Al- and N-codoped ZnO thin films // *Appl. Phys. Lett.* **86**, 202106 (2005).
- [47] L.L. Chen, J.G. Lu, Z.Z. Ye, Y.M. Lin, B.H. Zhao. Y.M. Ye. J. S. Li and L. P. Zhu, p-type behavior in In-N codoped ZnO thin films, *Appl. Phys. Lett.* 87, 252106 (2005).
- [48] А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, И.И. Ходос, Т.В. Никифорова, М.Н. Ковальчук. // *Микроэлектроника*, 31, 202 (2002).
- [49] А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, Е.Е. Якимов. Фотоэлектрические свойства пленок ZnO, легированных акцепторными примесями Cu и Ag // *Физика и техника полупроводников*, 37, 275 (2003).
- [50] А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, Л.Н. Матвеева. // *Микроэлектроника*, 31, 202 (2002).
- [51] M. Aven, J.S. Prener. *Physics and chemistry of II - VI compounds* (North-Holland PC, Amsterdam, 1967).
- [52] D.W. Ma, Z.Z. Ye, J.Y. Huang, L.P. Zhu, B.H. Zhao, J.H. He Effect of post-annealing treatments on the properties of Zn_{1-x}Cd_xO films on glass substrates // *Materials Science and Engineering B*, 111, 9-13, (2004)
- [53] H.W. Liang, Q.J. Feng, J.C. Sun, J.Z. Zhao, J.M. Bian, L.Z. Hu, H.Q. Zhang, Y.M. Luo and G.T. Du Room temperature electroluminescence from the ZnO homojunction grown on an n⁺-Si substrate by metal-organic chemical vapor deposition // *Semicond. Sci. Technol.*, 23, 025014 (2008).
- [54] H. Sun, Q. Zhang, J. Zhang, T. Deng, J. Wu Electroluminescence from ZnO nanowires with a p-ZnO film/n-ZnO nanowire homojunction // *Appl. Phys.*, B 90, 543-546 (2008).
- [55] Dae-Kue Hwang, Min-Suk Oh, Jae-Hong Lim, Yong-Seok Choi, and Seong-Ju Park ZnO-based light-emitting metal-insulator-semiconductor diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 91,121113(2007).
- [56] S.J. Jiao, Z. Z. Zhang, Y.M. Lu, D.Z. Shen, B. Yao, J.Y. Zhang, B.H. Li, D. X. Zhao, and X. W. Fan, Z.K. Tang ZnO p-n junction light-emitting diodes fabricated on sapphire substrates // *Appl. Phys. Lett.*, 88, 031911 (2006)
- [57] M. Pan, R. Rondon, J. Cloud, V. Rengarajan, W. Nemeth, A. Valencia, J. Gomez, N. Spencer and J. Nause ZnO based light emitting diodes growth and fabrication // *Proc. SPIE*, 6122, 61220M (2006).
- [58] Y.Y. Ryu, T.S. Lee, J.A. Lubguban, H.W. White, B.J. Kim, Y.S. Park and C.J. Youn Next generation of oxide photonic devices: ZnO-based ultraviolet light emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 88, 241108 (2006).
- [59] J.H. Lim, C.K. Kang, K.K. Kim, I.K. Park and S.J. Park UV Electroluminescence Emission from ZnO Light-Emitting Diodes Grown by High-Temperature Radiofrequency Sputtering // *Adv. Mater.*, 18, 2720 (2006).

- [60] T. Minami, M. Tanigawa, M. Yamanishi and T. Kawamura Observation of Ultraviolet-Luminescence from the ZnO MIS Diodes // *Japan. J. Appl. Phys.* 13 1475 (1974).
- [61] A. Shimizu, M. Kanbara, M. Hada and M. Kasuga ZnO Green Light Emitting Diode // *Japan. J. Appl. Phys.*, 17, 1435 (1978).
- [62] Ya.I. Alivov, D. C. Look, B.M. Ataev, M.V. Chukichev, V.V. Mamedov, V.I. Zinenko, Yu.A. Agafonov and A.N. Pustovit Fabrication of ZnO-based metal–insulator–semiconductor diodes by ion implantation // *Solid-State Electron.*, 48, 2343 (2004).
- [63] H.T. Wang, B.S. Kang, J.J. Chen, T. Anderson, S. Jang, F. Ren, H.S. Kim, Y.J. Li, D.P. Norton and S.J. Pearton Band-edge electroluminescence from N+-implanted bulk ZnO // *Appl. Phys. Lett.*, 88, 102107 (2006).
- [64] P. Chen, X. Ma and D. Yang Fairly pure ultraviolet electroluminescence from ZnO-based light-emitting devices // *Appl. Phys. Lett.*, 89, 111112 (2006).

I. Shteplyuk, G. Lashkarev, V Lazorenko, A. Ievtushenko

Technological and Material Science Aspects of Obtaining Light-Emitting Devices Based on ZnO (Review)

Frantsevich Institute for Problems of Material Science, NASU, 03680, Kiev -142, Ukraine
Phone: +38 044 424 15 24, Fax: +38 044 424 21 31, E-mail: iis87@i.ua

ZnO is attracting great attention due to its economical, ecological and technological advantages over GaN and due to its possible applications for fabrication of light-emitting devices (LED). In this paper last achievements in the field of ZnO are discussed. The present review is focused mainly on the problems of achievement of p-type ZnO, as well as existing diode structures based on ZnO are analyzed.

Key words: p-ZnO films, LED, activators of luminescence.