

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ SENSORS MATERIALS

УДК 539.216.2:520.8.054,

PACS: 61.72.U-, 72.40.+w, 81.05.Dz, 85.60.Dw

СТУПІНЬ САМОКОМПЕНСАЦІЇ ZnO СПІВЛЕГОВАНОГО АЗОТОМ ТА АЛЮМІНІЄМ

*А. І. Євтушенко¹, Г. В. Лашкарьов¹, Л. А. Косяченко², В. М. Склярчук², О. Ф. Склярчук²,
В. Й. Лазоренко¹, В. М. Ткач³*

¹Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України,
вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна
Тел. +38 044 424 15 24, Факс +38044 424 21 31,
e-mail: a.ievushenko@yahoo.com

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58012, Чернівці, Україна
Тел. +38 03722 44221, e-mail: lakos@chv.ukrpack.net

³Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська, 2, 04074, Київ, Україна
Тел. +38 044 432 99 32, e-mail: tkach@isp.kiev.ua

СТУПІНЬ САМОКОМПЕНСАЦІЇ ZnO СПІВЛЕГОВАНОГО АЗОТОМ ТА АЛЮМІНІЄМ

*А. І. Євтушенко, Г. В. Лашкарьов, Л. А. Косяченко, В. М. Склярчук, О. Ф. Склярчук,
В. Й. Лазоренко, В. М. Ткач*

Анотація. Представлено результати експериментального дослідження електропровідності співлегованих азотом (до 4,3 атомних %) та алюмінієм (2,4 атомних %) n-типу плівок ZnO:N:Al, осаджених методом високочастотного магнетронного розпилення на підкладках p-Si. З аналізу температурних залежностей питомого опору й енергії рівня Фермі знайдено енергію іонізації і ступінь компенсації домішок (дефектів), відповідальних за електропровідність досліджених зразків.

Ключові слова: плівки ZnO, Al-N співлегкування, електропровідність, самокомпенсація

THE LEVEL OF SELF-COMPENSATION OF ZnO CODOPED BY NITROGEN AND ALUMINUM

*A. I. Ievtushenko, G. V. Lashkarev, L. A. Kosyachenko, V. M. Sklyarchuk, O. F. Sklyarchuk,
V. I. Lazorenko, V. M. Tkach*

Abstract. The results of experimental investigation of conductivity of codoped by nitrogen (up to 4.3 atomic %) and by aluminum (2.4 atomic %) n-type ZnO:N:Al films, deposited by radio frequency magnetron sputtering on p-Si substrates, are presented. Using the analysis of temperature dependences of resistivity and of the energy of the Fermi level, the ionization energy and the degree of compensation

of impurities (defects) which responsible for the electrical conductivity of the investigated samples is calculated.

Keywords: ZnO films, Al-N codoping, conductivity, self-compensation

СТЕПЕНЬ САМОКОМПЕНСАЦИИ ZNO СОЛЕГИРОВАНОГО АЗОТОМ И АЛЮМИНИЕМ

*А. И. Евтушенко, Г. В. Лашкарев, Л. А. Косяченко, В. М. Склярчук, Е. Ф. Склярчук,
В. И. Лазоренко, В. Н. Ткач*

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования электропроводности солегированных азотом (до 4,3 атомных %) и алюминием (2,4 атомных %) n-типа пленок ZnO:N:Al, осажденных методом высокочастотного магнетронного распыления на подложки p-Si. Из анализа температурных зависимостей удельного сопротивления и энергии уровня Ферми найдено энергию ионизации и степень компенсации примесей (дефектов), ответственных за электропроводность исследованных образцов.

Ключевые слова: пленки ZnO, Al-N солегирование, электропроводимость, самокомпенсация

Вступ

Оксид цинку (ZnO) у формі об'ємних кристалів, тонких плівок та наноструктур є важливим матеріалом для нового покоління різноманітних оптоелектронних приладів [1, 2]. Для їх реалізації необхідна висока якість ZnO як n-типу, так і р-типу провідності. Однак, технологія вирощування високопровідного n-типу та стабільного р-типу провідності в ZnO стикається з серйозними проблемами.

Давно відомо, що нелегований ZnO має завжди n-типу провідності, що зумовлено відхиленням його складу від стехіометричного чи/та присутністю донорної домішки водню [3]. Легування елементами III групи періодичної системи (Al, Ga, In) дозволяє отримати низькоомні прозорі плівки ZnO з концентрацією електронів $> 10^{20} \text{ см}^{-3}$, придатні для застосування в сонячних елементах і рідкокристалічних дисплеях [4]. Однак, при великій концентрації донорної домішки опір оксиду виявляється занадто високим, що не корелює з концентрацією введеної домішки. Проблема створення низькоомного ZnO n-типу провідності пов'язують з високою *самокомпенсацією* введених донорних домішок генерованими власними дефектами акцепторного типу. Наприклад, в роботі [5] показано, що введення Ga в кількості $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ призводить до виникнення вакансій Zn (V_{Zn}) з

концентрацією $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, які мають акцепторні властивості.

Акцепторними домішками в ZnO є елементи V групи періодичної системи (N, P, As та Sb), першої групи (Li, Na, K), а також Cu та Ag. Показано, що короткочасну високу концентрацію дірок (до 10^{19} см^{-3}) в оксиді цинку можна досягти застосовуючи легування останнього елементами V групи [6, 7]. Проте ефект *самокомпенсації* має місце і при легуванні ZnO акцепторами. При легуванні ZnO в останньому можуть утворюватись такі дефекти донорного типу як вакансії кисню (V_O) та атоми цинку в міжвузлях (Zn_i) а також такі акцепторні дефекти як атоми кисню в міжвузлях (O_i) та атоми цинку в позиціях кисню (O_{Zn}) [8]. Також зазначимо, що при легуванні акцепторною домішкою азоту молекули N_2 можуть заміщувати атоми кисню, призводячи до утворення дефектів типу ($N_{2(O)}$), які створюють в забороненій зоні ZnO донорні рівні [9]. Виникненням різноманітних власних дефектів та їх комбінацій пояснюється «парадокс» випадку, коли введення домішки призводить не до зменшення, а, навпаки, до збільшення питомого опору матеріалу [8].

Отже, варто зазначити, що саме самокомпенсація власними донорними дефектами введених акцепторних домішок є основною проблемою при отриманні відтвореного та стабільного р-типу провідності в оксиді цинку.

До інших труднощів, що стоять на шляху до отримання в ZnO р-типу, варто також віднести значну глибину залягання введених акцепторних домішок та їх низьку розчинність [10]. Для вирішення вказаних проблем Т. Yamamoto та Н. Katayama-Yoshida запропонували [11] метод легування, який полягає в одночасному легуванні як акцепторною домішкою (наприклад N, P чи As) так і донорною (наприклад Al, Ga чи In). Таке співлегування понижує енергію Маделунга за рахунок утворення в ZnO комплексів типу акцептор-донор-акцептор, що сприяє зростанню розчинності акцепторних домішок в ZnO та зменшенню енергії іонізації акцепторних центрів. Відмітимо, що співлегування азотом та алюмінієм є комерційно привабливим для отримання р-типу провідності в ZnO за рахунок розповсюдженості в природі вихідних речовин [12].

Тож метою цієї роботи є виявлення впливу впровадження значної концентрації акцепторної домішки азоту на електрофізичні властивості оксиду цинку шляхом застосування методу легування останнього азотом з алюмінієм. В роботі представлено експериментальні результати, що засвідчують не лише компенсаційний характер електропровідності легованих азотом плівок ZnO, але й дозволяють визначити як енергію іонізації, так і ступінь компенсації домішок (дефектів), відповідальних за електропровідність матеріалу.

1. Виготовлення зразків і методи дослідження

Співлеговані азотом та алюмінієм плівки оксиду цинку були осаджені методом високочастотного (ВЧ) магнетронного розпилення на р-Si підкладки ($\rho_n = 9 \text{ Ом}\cdot\text{кв}$) з використанням методу багатостадійного (пошарового) росту [13]. Цинковий диск (чистотою 99,99 %) з вставками Al (чистотою 99,99 %) використовували в якості мішені. Площа Al вставок становила 1,4 % робочої площі Zn мішені. Співлегування азотом з алюмінієм плівок ZnO провели змінюючи тиск азоту (N_2) в камері осадження від 0,4 до 0,8 Па з кроком 0,2 Па при фіксованих наступних робочих параметрах: потужності ВЧ розряду,

що складала 200 Вт; тиску кисню та аргону – 0,9 та 1 Па; температури підкладки — 270 °С; відстані мішень-підкладка — 7 см та сумарного часу 3-стадійного осадження — 18 хвилин.

Елементний аналіз плівок було проведено за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 50 XVP SEM з використанням рентгеноспектрального електронно-зондового пристрою (EDX) INCA 450 OXFORD Instruments. Товщину плівок визначали з профілів їх СЕМ зображень.

Для дослідження електричних характеристик легованих плівок ZnO, осаджених на підкладки р-Si, наносили металеві In контакти методом вакуумного термічного осадження (Рис. 1).

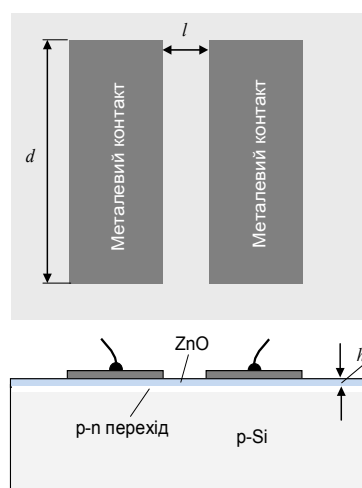


Рис. 1. Конфігурація контактів для дослідження електричних характеристик шарів ZnO ($d = 820 \text{ мкм}$, $l = 210 \text{ мкм}$).

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) досліджували за стандартною методикою із застосуванням цифрового вольтметра і мікроамперметра. Для температурних досліджень зразки установлювали у термостат, оснащений термоелектричним охолоджувачем, що забезпечувало виміри в діапазоні 260-360 К.

2. Результати та обговорення

На Рис. 2 приведено результати елементного аналізу плівок ZnO, співлегованих азотом та алюмінієм (ZnO:N:Al), та їх товщини h . Як видно з рисунку, зі збільшенням тиску азоту в камері осадження з 0,4 до 0,8 Па концентрація азоту в плівці оксиду сублінійно збільшується

з 2,3 до 4,3 атомних %, відповідно. Концентрація алюмінію у всіх плівках оксиду цинку складала 2,4 ат.%. Застосувавши метод подвійного легування Al та N, нам вдалося збільшити розчинність азоту в ZnO майже в два рази, порівнюючи з легуванням, коли використовується лише азот [2]. Відмітимо, що при такому методі вирощування, азот являється активатором швидкості росту плівок ZnO:N:Al, яка лінійно збільшується зі зростанням тиску азоту в камері осадження.

Відразу ж зазначимо, що значне збільшення концентрації азоту до 4,3 атом.% не призвело до утворення р-типу провідності в оксиді цинку і всі осаджені плівки мали n-тип провідності, про що засвідчили термоелектричні дослідження.

Оскільки на контакті n-ZnO з p-Si створюється р-n гетероперехід (Рис. 1), то всі осаджені плівки є ізольованими від підкладки шаром об'ємного заряду. Отже, знаючи довжину контактів d , віддаль між ними l , товщину шару оксиду цинку h , а також опір між контактами $R = VI$ (V – прикладена між контактами напруга, I – струм), можна знайти питомий опір матеріалу

$$\rho = R \frac{hd}{l} \quad (1)$$

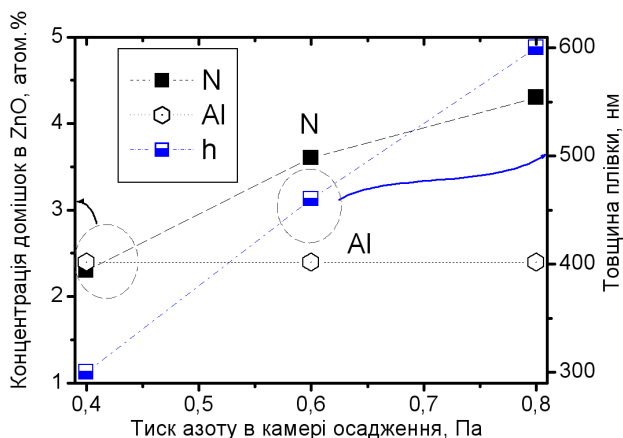


Рис. 2 Залежність концентрації азоту та алюмінію в плівках ZnO та їх товщини h від тиску азоту в камері осадження.

Рівняння (1) має сенс за умови омичності контактів, що підтверджується наведеними на Рис. 3 залежностями диференційного опору

плівок, дослідженого при температурі 300 К в інтервалі напруг 0,1-10 В. Як видно, диференційний опір (R_{dif}) відносно мало змінюється з напругою, а при напругах, нижчих за 2-3 В, залишається практично постійним, тобто при низьких напругах In контакти до плівок є омичними.

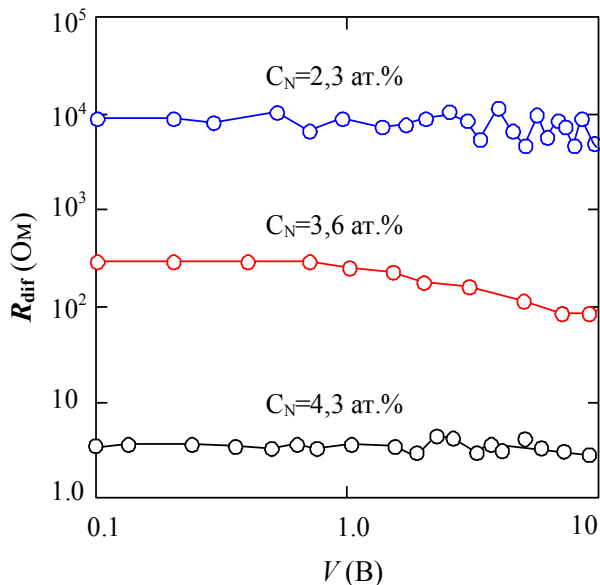


Рис. 3. Залежність диференційного опору плівок ZnO:N:Al, легуваних азотом з концентрацією C_N , від прикладеної напруги V при кімнатній температурі.

На Рис. 4 наведено температурні залежності питомого опору $lg\rho$ плівок ZnO:N:Al, легуваних різною концентрацією азоту. Як видно, плівки ZnO:N:Al різняться як за величиною питомого опору, так і за енергією термічної активації. Енергія термічної активації, знайдена по нахилу прямих, та питомий опір, досліджений при кімнатній температурі, зменшуються з 0,29 еВ та $5,3 \times 10^3$ Ом \times см до 0,095 еВ та 3,1 Ом \times см відповідно зі збільшенням концентрації азоту в плівці з 2,3 до 4,3 ат. % (див. нижче Табл. 1). Таке зменшення питомого опору співлегуваних азотом та алюмінієм плівок ZnO може бути викликане генерацією в останньому власних дефектів донорного типу та можливим утворенням донорних дефектів типу $N_{2(O)}$ [9].

Для напівпровідника n-типу провідності концентрацію електронів у зоні провідності n можна виразити через їх рухливість μ_n і питомий опір ρ :

$$n = \frac{1}{q\rho\mu_n} \quad (2)$$

де q – заряд електрона.

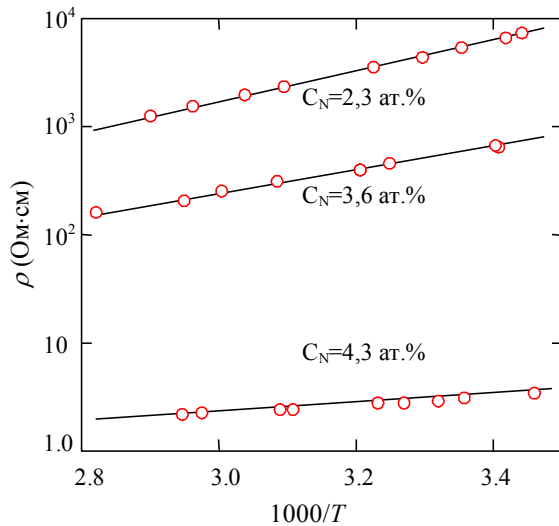


Рис. 4. Температурні залежності питомого опору плівки ZnO.

Результати розрахунку концентрації електронів n за формулою (2), виходячи з вимірних температурних залежностей $\rho(T)$, наведені на рис. 5. При розрахунках для рухливості електронів μ_n і її температурної залежності застосовувався вираз, який добре узгоджується як з експериментальними даними, так і з результатами моделювання Монте Карло з урахуванням основних механізмів розсіювання [3, 14]:

$$\mu_n = 205 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2} \text{ см}^2/(\text{В}\times\text{с}). \quad (3)$$

Як видно з Рис. 5, концентрація електронів в легованих плівках ZnO при температурі 300 К зростає зі збільшенням концентрації азоту. Відповідно, при цьому зменшуються енергії активації концентрації електронів ΔE_n (0,32, 0,23 і 0,13 eV). Зрозуміло, що термічні енергії активації концентрації електронів ΔE_n і питомого опору ΔE_p (див.Табл.1) близькі за величиною, хоч і дещо різняться, оскільки ΔE_p залежить від температурної залежності рухливості μ_n .

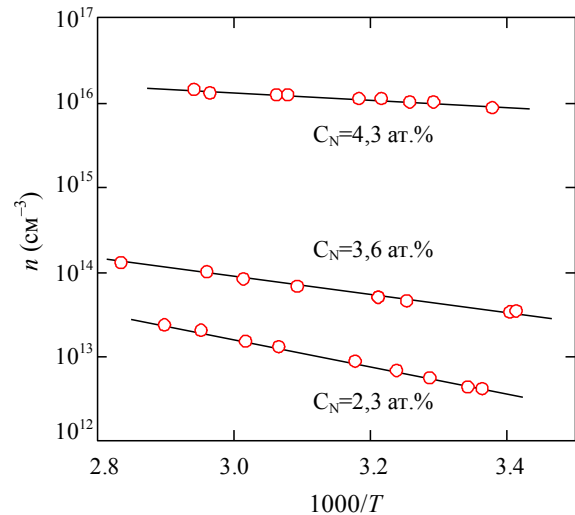


Рис. 5. Температурна залежність концентрації електронів.

Проаналізуємо температурну залежність рівня Фермі в плівках ZnO, що надасть інформацію про енергетичний рівень донорної домішки (дефекту).

Концентрація електронів у зоні провідності n зв'язана з енергією рівня Фермі $\Delta\mu$ співвідношенням [15]:

$$n = \frac{N_c}{\exp\left(\frac{\Delta\mu}{kT}\right) + 1}, \quad (4)$$

де $\Delta\mu$ відраховується від дна зони провідності, як це показано на Рис. 6, а N_c – ефективна густина станів у зоні провідності:

$$N_c = 2 \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi\hbar} \right)^{3/2}, \quad (5)$$

m_n^* – ефективна маса електронів ($m_n^* = 0.24 m_0$ [16]).

З виразу для концентрації електронів (3) знаходимо енергію рівня Фермі

$$\Delta\mu = kT \ln\left(\frac{N_c}{n}\right), \quad (6)$$

що, знаючи $n(T)$, дозволяє знайти температурні залежності $\Delta\mu(T)$, показані на Рис. 6.

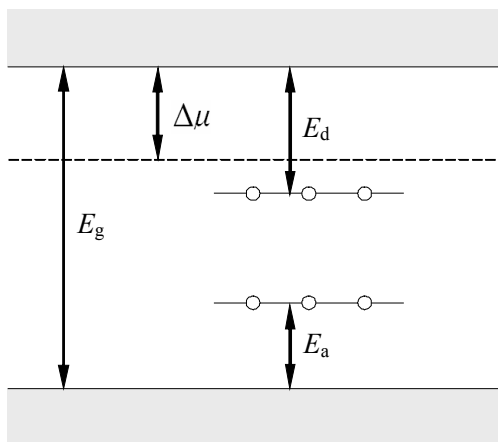


Рис. 6. Енергетична схема легованого ZnO.

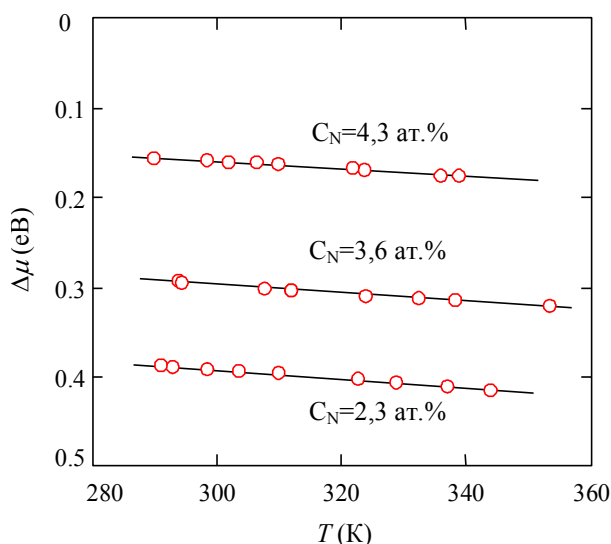


Рис. 7. Температурна залежність рівня Фермі в забороненій зоні ZnO

Як видно з Рис. 7, величина $\Delta\mu$ в усьому температурному інтервалі перевищує енергію активації питомого опору й концентрації електронів.

Рівень домішки (дефекту), відповідального за електропровідність матеріалу і ступінь його компенсації, знайдемо виходячи з рівняння електронейтральності, яке для енергетичної схеми, показаної на Рис. 6, має вигляд:

$$p + N_d^+ = n + N_a^-, \quad (7)$$

де p — концентрація дірок у валентній зоні, n — концентрація електронів в зоні провідності,

N_d^+ і N_a^- — концентрація заряджених донорів і акцепторів відповідно.

Для досліджуваного ZnO n-типу провідності можна знехтувати концентрацією дірок у валентній зоні p , більше того, можна також знехтувати концентрацією електронів n у зоні провідності ($< 10^{16} \text{ см}^{-3}$) порівняно з концентрацією домішок і дефектів, рівні яких у забороненій зоні розглядаються. Прийmemo, що акцептори, які компенсують донори, розташовані в нижній половині забороненої зони, повністю іонізовані, а тому $N_a^- = N_a$.

Отже, рівняння електронейтральності (7) зводиться до рівності [15]:

$$\frac{N_d}{\exp\left(\frac{E_d - \Delta\mu}{kT}\right) + 1} = N_a, \quad (8)$$

ліва частина якої виражає концентрацію дірок на донорах (E_d — їх енергія іонізації).

Розв'язок рівняння (8) відносно $\Delta\mu$ дає:

$$\Delta\mu(T) = E_d - kT \ln\left(\frac{1 - \zeta}{\zeta}\right), \quad (9)$$

де $\zeta = N_a / N_d$ — ступінь компенсації донорів.

Отриману температурну залежність рівня Фермі нескладно зіставити з експериментальними залежностями $\Delta\mu(T)$, варіюючи величинами E_d (зсув по вертикальній осі) і ζ , що визначає нахил прямої. Результати такого зіставлення наведено на Рис. 7, де суцільними лініями показано результати розрахунку за формулою (9), у той час як кружечками — результати експерименту. Зі збільшенням концентрації легуючої домішки азоту в ZnO з 2,3 до 4,3 ат.% енергія її іонізації (E_d) та ступінь компенсації донорів (ζ) зменшуються від $E_d = 0,29 \text{ eV}$ і $\zeta = 0,98$ до $E_d = 0,095 \text{ eV}$ і $\zeta = 0,91$, відповідно. Знайдені параметри, що характеризують електричні властивості досліджуваних плівок ZnO:N:Al зведені в Таблиці 1.

З отриманих результатів видно, що, поперше, досліджені плівки ZnO є сильно компенсованими напівпровідниками, ступінь компенсації яких становить 91-98%, що забезпечує відносно високий питомий опір матеріалу в межах від ~ 3 до $\sim 5 \times 10^3 \text{ Ом} \times \text{см}$ навіть при

Таблиця 1 Параметри плівок ZnO, співлегованих азотом та алюмінієм

Плівка (C _N ; C _{Al} , ат.%)	Тип провідності	Питомий опір при 300 К, Ом·см	Концентрація електронів при 300 К, см ⁻³	Енергія активації питомого опору, еВ	Енергія іонізації домішки (дефекту), еВ	Ступінь компенсації
ZnO:N:Al (2,3; 2,4)	n	5,3·10 ³	6,3·10 ¹²	0,29	0,29	0,98
ZnO:N:Al (3,6; 2,4)	n	5,5·10 ²	8,8·10 ¹³	0,21	0,21	0,95
ZnO:N:Al (4,3; 2,4)	n	3,1	9,8·10 ¹⁵	0,075	0,095	0,91

сильному легуванні й підтверджує результати теоретичних розрахунків на основі перших принципів [17]. По-друге, при збільшенні концентрації азоту при співлегуванні Al та азотом ступінь компенсації в осаджених плівках ZnO зменшується, що приводить до переміщення рівня Фермі до зони провідності, збільшення концентрації вільних електронів і, як наслідок, до зменшення питомого опору матеріалу.

4. ВИСНОВКИ

Співлеговані різною концентрацією азоту та алюмінієм плівки ZnO були осаджені методом ВЧ магнетронного розпилення на p-Si підкладки. Продемонстровано, що застосування методу подвійного легування дозволяє збільшити розчинність азоту в оксиді цинку майже в 2 рази, порівняно з легуванням, коли використовується лише азот.

Проведено дослідження питомого опору і розрахунки концентрації електронів у зоні провідності в плівках ZnO у температурному інтервалі 290-350 К. Виявлено, що зі збільшенням концентрації азоту в плівці оксиду з 2,3 до 4,3 ат.% їх питомий опір та енергія активації питомого опору зменшуються 5,3×10³ та 0,29 еВ до 3,1 Ом·см та 0,075 еВ, відповідно. Така зміна параметрів зумовлена генерацією дефектів донорного типу в оксиді цинку як результат впровадження значної концентрації акцепторної домішки азоту.

З температурних залежностей рівня Фермі знайдено, що леговані плівки ZnO є сильно компенсованими напівпровідниками, ступінь компенсації яких становить 91-98%.

Показано, що енергія іонізації домішки (дефекту) збільшується від 0,095 до 0,29 еВ зі зменшенням концентрації азоту від 4,3 до 2,3 ат.%.

Список використаної літератури

1. А. І. Євтушенко, Г. В. Лашкар'єв, В. Й. Лазоренко, В. А. Карпина, В. Д. Храновський ZnO-детектори ультрафіолетового випромінювання. Огляд // ФХТТ. — 2008. — Т.9, № 6. — С. 869-882.
2. Г. В. Лашкарев, В. А. Карпина, В. И. Лазоренко, А. И. Евтушенко, И. И. Штеплюк, В. Д. Храновский Свойства оксида цинка при низких и средних температурах // ФНТ. — 2011. — Т. 37, № 3. — С. 289-300.
3. D. C. Look, D. C. Reynolds, J. R. Sizelove, R. L. Jones, C. W. Litton, G. Cantwell, W. C. Harsch Electrical properties of bulk ZnO // Solid State Communications. — 1998. — V.105, №6. — P. 399-401.
4. W. Lee, R. P. Dwivedi, C. Hong, H. W. Kim, N. Cho, and C. Lee. Enhancement of the electrical properties of Al-doped ZnO films deposited on ZnO-buffered glass substrates by using an ultrathin aluminum underlayer // J. Mater. Sci. — 2008. — V. 43. — P.1159-1161.
5. D. C. Look, K. D. Leedy, L. Vines, B. G. Svensson, A. Zubiaga, F. Tuomisto, D. R. Doust, and L. J. Brillson Self-compensation in semiconductors: The Zn vacancy in Ga-doped ZnO // Phys. Rev. B. — 2011. — V. 84. — P. 115202.
6. M.-L. Tu, Y.-K. Su, and C.-Y. Ma Nitrogen-doped p-type ZnO films prepared from nitrogen gas radio-frequency magnetron sputtering // J. Appl. Phys. — 2006. — V.100. — P. 053705.

7. W.-J. Lee, J. Kang and K.J. Chang p-Type Doping and Compensation in ZnO // J. Korean Physical Society. — 2008. — V. 53, №1. — P. 196–201.
8. Y. Liu, H.-J. Jin, and C.-B. Park, G.C. Hoang Analysis of Photoluminescence for N-doped and undoped p-type ZnO // Transactions on Electrical and Electronic Materials. — 2009. — V. 10. — P. 24–27.
9. Y. Cui and F. Bruneval P-type doping and codoping of ZnO based on nitrogen is ineffective: An *ab initio* clue // Appl. Phys. Lett. — 2010. — V.97. — P.042108.
10. C.H. Park, S.B. Zhang, S.-H. Wei Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective// Phys. Rev. B. — 2002. — V.66.— P.073202.
11. T. Yamamoto Unipolarity of ZnO with a wide-band gap and its solution using codoping method / T.Yamamoto, H. Katayama-Yoshida// J.Crystal Growth.— 2000.— V. 214/215. — P.552-555.
- А. І. Євтушенко, Г. В. Лашкар'єв, В. В. Стрельчук, В. Й. Лазоренко, Л. О. Клочков, О. С. Литвин, В. М. Ткач, А. С. Романюк, К. А. Авраменко, О. І. Биков, В. А. Батурин, О. Ю. Карпенко Структурні перетворення в плівках ZnO при їх легуванні Нітрогеном та Al—N співлегуванні // Металофізика та новітні технології, Спецвипуск. — 2011. — Т.33. — С. 243–254.
12. А. І. Євтушенко, В. Й. Лазоренко, Г. В. Лашкар'єв, В. А. Карпина, В. А. Батурин, А. Ю. Карпенко, Л. М. Удовенко Фізичні принципи росту товстих структурно досконалих плівок ZnO при магнетронному розпиленні //Ж. Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 2. — С. 325–331.
13. F. Bertazzi, E. Bellotti, E. Furno, and M. Goano Experimental Electron Mobility in ZnO: A Re-assessment Through Monte Carlo Simulation // J. Electronic Materials. — 2009. — V.38, № 8. — P.11664.
14. К. Зеєгер Фізика напівпровідників. — Мир: Москва: 1977. — 611с.
15. M Oshikiri, Y Imanaka, F Argasetiawan, and G Kido Comparison of the electron effective mass of the n-type ZnO in the wurtzite structure measured by cyclotron resonance and calculated from first principle theory // Physica B: Condensed Matter. — 2001. — V. 298, № 1–4. — P.472–476.
16. G. Mandel Self-Compensation Limited Conductivity in Binary Semiconductors. I. Theory// Phys. Rev. — 1964. — V. 134. — P.A1073–A1079.