

9. Dillenza, A. Ultrasound lockin thermography: feasibilities and limitations [Текст] / A. Dillenza, G. Bussea, D. Wub // In: Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Heidelberg: Springer-Verlag. – 1998. – P. 412-418.
10. Базалєєв, Н. И. Концепція розвитку неруйнівних методів контролю енергетичного обладнання АЕС на основі кореляційної ІЧ-радіометрії [Текст] / Н. И. Базалєєв, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецький, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2008. – №4/5(34). – С. 10-16.

*Представлено результати дослідження електрофізичних параметрів (постійної Холла, питомого опору, рухливості) ниткоподібних мікрокристалів  $Ga_xIn_{1-x}As$ , вирошених з газової фази, в діапазоні складів бінарних компонентів  $0,3 \leq x \leq 0,8$ . За характером зміни температурних залежностей цих параметрів в зоні власної та змішаної провідності були проведені розрахунки ширини забороненої зони для досліджуваних мікрокристалів. Показані результати дослідження впливу нейтронного опромінення на параметри вирошених мікрокристалів та визначений склад твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$ , для якого зміна параметрів під дією опромінення є мінімальною*

*Ключові слова: ниткоподібні мікрокристали,  $Ga_xIn_{1-x}As$ , електрофізичні параметри, ширина забороненої зони, радіаційна стійкість*

*Представлены результаты исследования электрофизических параметров (постоянной Холла, удельного сопротивления, подвижности) нитевидных микрокристаллов  $Ga_xIn_{1-x}As$ , выращенных из газовой фазы, в диапазоне составов бинарных компонентов  $0,3 \leq x \leq 0,8$ . По характеру изменения температурных зависимостей этих параметров в зоне собственной и смешанной проводимости были проведены расчеты ширины запрещенной зоны для исследуемых микрокристаллов. Показаны результаты исследования влияния нейтронного облучения на параметры выращенных микрокристаллов и определен состав твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}As$ , для которого изменение параметров под действием облучения минимальна*

*Ключевые слова: нитевидные микрокристаллы,  $Ga_xIn_{1-x}As$ , электрофизические параметры, ширина запрещенной зоны, радиационная стойкость*

УДК 621.315.592

# ОСНОВНІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ НИТКОПОДІБНИХ МІКРОКРИСТАЛІВ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ $Ga_xIn_{1-x}As$

**І. А. Большакова**

Доктор технічних наук,  
професор, завідувач лабораторії  
Лабораторія магнітних сенсорів\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Я. Я. Кость**

Кандидат технічних наук, науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**О. Ю. Макідо**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Р. М. Стецко**

Молодший науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Ф. М. Шурігін**

Кандидат технічних наук, провідний спеціаліст\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

\*Кафедра напівпровідникової електроніки\*\*\*

\*\*Лабораторія магнітних сенсорів\*\*\*

\*\*\*Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. Котляревського 1, м. Львів, Україна 79013

## 1. Вступ

Електронні прилади, виготовлені на основі напівпровідникових сполук  $A^{III}B^V$  та їх твердих розчинів, на даний час знаходять все більш широке застосування в різних сферах електроніки, телекомунікації та оптоелектроніки. Так напівпровідниковий твердий розчин  $Ga_xIn_{1-x}As$  широко використовується для розробки приладів електронної техніки різних напрямків.

Після катастроф у Чорнобилі і Фукусімі особливо актуальною є проблема пошуку матеріалів зі стабільністю параметрів в жорстких радіаційних умовах. Потрібні напівпровідникові сполуки  $A^{III}B^V$ , зокрема  $Ga_xIn_{1-x}As$ , є перспективними для створення на їх основі радіаційностійких сенсорів за рахунок збереження у твердому розчині індивідуального поведінки підграток бінарних компонентів та протилежного напрямку зміни концентрації при високих дозах радіаційного опромі-

нення (для InAs характерне збільшення концентрації вільних носіїв заряду, для GaAs – зменшення). Вибором оптимального складу твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  можна компенсувати зміни концентрацій носіїв заряду в кожній підгратці, що дозволяє досягнути стабільності параметрів в жорстких радіаційних умовах. Це дуже важливо для використання пристроїв на основі таких твердих розчинів в ядерних реакторах, АЕС, прискорювачах елементарних частинок і в космосі. Радіаційностійкі матеріали, які могли б використовуватися для виготовлення на їх основі магнітовимірвальних сенсорів, особливо цікаві для використання у Великому адронному колайдері (ЦЕРН, Швейцарія) та установках термоядерного синтезу типу «токамак», таких як JET (Великобританія), Tore Supra (Франція), міжнародний дослідницький реактор ITER, що будується, тощо.

## 2. Аналіз літератури

В наукових виданнях відсутня інформація про дослідження електрофізичних параметрів та впливу на них нейтронного опромінення в ниткоподібних мікрокристалах твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  складу  $x=0,2\div 0,8$ , вирощених методом хімічних транспортних реакцій за механізмом пара-рідина-кристал. Тому такі дослідження є цікавими як з точки зору оцінки ефективності самого методу вирощування таких матеріалів так і для модельних розрахунків їх параметрів і визначення галузей можливих застосувань.

Тверді розчини  $Ga_xIn_{1-x}As$  складу  $x=0,96$  використовують для потужних лазерів квазінеперервних хвиль [1], складу  $x=0,8\div 0,9$  для лазерів на квантових точках з піковими довжинами хвиль генерованого випромінювання  $1,22\div 1,25$  мкм [2]. Фотолюмінісценція  $In_{0,4}Ga_{0,6}As/GaP_{0,15}As_{0,4}Sb_{0,45}/In_{0,4}Ga_{0,6}As$  структур на квантових точках в діапазоні  $1,3\div 1,5$  мкм [3], робить такі структури перспективним для використання в оптичних лініях передачі сигналів. Різні склади твердих розчинів використовуються для виготовлення приладів нічного бачення, транзисторів з високою рухливістю електронів та ін. Також твердий розчин  $Ga_xIn_{1-x}As$  ( $x\geq 0,75$ ) є перспективним матеріалом для використання у якості чутливого елемента сенсорів фізичних величин у радіаційних умовах [4].

При вирішенні високоточних вимірвальних задач, необхідних для забезпечення високої чутливості приладів, використовуються напівпровідникові сенсори, виготовлені за планарною технологією.

Основна проблема, що стосується отримання якісних тонких плівок твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$ , це відсутність узгодженої по гратці напівізолюючої підкладки. Віскерні технології, зокрема механізм «пара-рідина-кристал» (ПРК-механізм), дозволяють елегантно вирішити цю проблему і вирощувати нанота мікрокристали твердих розчинів у широкому діапазоні складів, оскільки при цьому підкладками для віскерів є фрагменти полікристалічної плівки, осадженої на перших етапах процесу вирощування. Структурні дослідження показують високу кристаллографічну досконалість віскерів, міцність, близьку до теоретичної, і багато інших унікальних властивостей [5].

## 3. Постановка проблеми

Одним з найважливіших аспектів при дослідженні параметрів напівпровідникових кристалів є визначення їх електрофізичних властивостей та розрахунків кінетичних коефіцієнтів. Високу інформативність мають результати досліджень температурних залежностей цих коефіцієнтів. Аналіз температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів дає інформацію про переважаючий механізм розсіювання носіїв заряду в обраних інтервалах температур. Аналіз цих залежностей в області високих температур дозволяє розрахувати такий важливий параметр напівпровідникового кристалу як ширина забороненої зони. Ширина забороненої зони є одним з основних параметрів напівпровідникового матеріалу, які визначають його електрофізичні властивості. В твердих розчинах, зокрема в  $Ga_xIn_{1-x}As$ , величина ширини забороненої зони залежить від складу бінарних сполук і може бути одним з критеріїв його оцінки.

В даній роботі представлені результати дослідження параметрів ниткоподібних мікрокристалів твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  вирощених з газової фази, а також дослідження впливу нейтронного опромінення на їх параметри.

Інформація, одержана з температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів (постійної Холла, питомого опору, рухливості носіїв заряду), дає можливість сформувати робочі параметри приладів, виготовлених на основі досліджуваних матеріалів, а також є надзвичайно важливою для формування технологічних режимів, за якими будуть одержані кристали із заданими електрофізичними властивостями.

Дослідження впливу нейтронного опромінення на мікрокристали твердих розчинів  $Ga_xIn_{1-x}As$  є особливо актуальним і дозволяє оцінити стабільність та точність приладів на основі такого матеріалу при роботі в жорстких радіаційних умовах, а також перспективу використання таких приладів в термоядерній енергетиці, прискорювачах частинок, освоєнні космосу тощо.

## 4. Електрофізичні властивості мікрокристалів твердого розчину $Ga_xIn_{1-x}As$

Для дослідження електрофізичних параметрів та їх температурних залежностей використовувалися зразки твердого розчину GaAs-InAs у формі ниткоподібних мікрокристалів, вирощені осадженням з парової фази у закритій системі методом хімічних транспортних реакцій за механізмом пара-рідина-кристал. Вирощування відбувалося у кварцевих реакторах, завантажених вихідними бінарними сполуками (GaAs та InAs), транспортним газом (HCl), а також невеликою кількістю каталізатора ПРК-механізму (Au). Необхідні температурні режими [6] досягалися за допомогою трьохзонної трубчастої печі опору, схема якої представлена на рис. 1.

Віскерна технологія дозволила вирішити проблему якості отриманих зразків  $Ga_xIn_{1-x}As$ , а також отримати зразки в широкому діапазоні складів ( $0,2\leq x\leq 0,8$ ) [6].

Для створення омичних контактів до мікрокристалів  $Ga_xIn_{1-x}As$  використовувався метод точкового електроварування (рис. 2). Контактною дротинкою

служила золота мікродротина діаметром  $(10 \pm 20)$  мкм. Опір створених контактів не перевищував  $(0,1 \pm 0,3)$  Ом, що становило  $(1 \pm 2)$  % від опору зразка. Вольт-амперні характеристики контактів були лінійними, а опір контактів не залежав від величини струму аж до густини струмів  $1,5 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>.

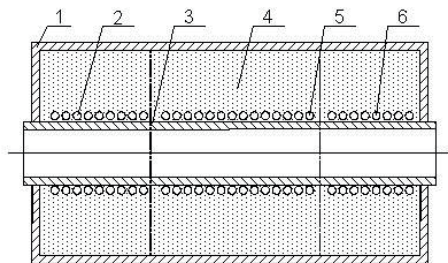


Рис. 1. Конструкція тризонної печі опору для проведення процесів росту ниткоподібних мікрочастин  $Ga_xIn_{1-x}As$ : 1 – корпус, 2 – перша нагрівна зона, 3 – керамічна труба, 4 – теплоізоляція, 5 – друга нагрівна зона, 6 – третя нагрівна зона



Рис. 2. Зразок, підготовлений для проведення холлівських вимірювань:  $I_1, I_2$  – струмові виводи;  $V_{H1}, V_{H2}$  – Холлівські виводи;  $V_P$  – потенціометричний вивід

Дослідження електрофізичних параметрів вирощених мікрочастин  $Ga_xIn_{1-x}As$  проводилося за допомогою Холлівських вимірювань на вимірювальному стенді Н-5 Лабораторії Магнітних Сенсорів в магнітному полі індукцією 320 мТл, при робочому струмі 10 мА та діапазоні температур  $77 \div 600$  К. Похибка вимірювань складала  $\pm 1$  %.

На основі масиву даних отриманого вимірюванням холлівських напруг зразків при двох напрямках струму під дією магнітного поля (два напрямки) та без в діапазоні температур  $77 \div 600$  К були розраховані електрофізичні параметри, зокрема постійна Холла за формулою:

$$R_H = \frac{V_H \cdot S}{I \cdot B \cdot L_H} \quad (1)$$

де  $V_H$  - холлівська напруга;  $S$  - площа зразка;  $I$  - струм через зразок;  $B$  - індукція магнітного поля;  $L_H$  - відстань між холлівськими контактами.

Концентрація вільних електронів в досліджуваних зразках визначалась за формулою:

$$n_i = \frac{1}{e \cdot R_i} \quad (2)$$

де  $R_i$  – коефіцієнт Холла в області власної провідності.

Значення основних кінетичних коефіцієнтів (постійна Холла, концентрація носіїв заряду, питомий

опір та рухливість) вирощених мікрочастин твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  широкого діапазону складів за кімнатної температури представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Електрофізичні параметри кристалів  $Ga_xIn_{1-x}As$  при  $T = 300$  К

N	Склад $Ga_xIn_{1-x}As$		Постійна Холла $R_{Hx}$ , см <sup>3</sup> /Кл	Концентрація н.з. $n$ , см <sup>-3</sup>	Питомий опір $\rho \cdot 10^4$ , Ом · см	Рухливість н.з. $\mu$ , см <sup>2</sup> /Вс
	x	1-x				
1	0,32	0,68	16,33	$3,8 \cdot 10^{17}$	16,92	9652
2	0,40	0,60	10,23	$6,1 \cdot 10^{17}$	13,33	7669
3	0,47	0,53	13,35	$4,7 \cdot 10^{17}$	33,50	3986
4	0,54	0,46	22,86	$2,7 \cdot 10^{17}$	35,14	6506
5	0,63	0,37	63,19	$9,9 \cdot 10^{16}$	163,52	3864
6	0,80	0,20	151,88	$4,1 \cdot 10^{16}$	396,83	3827

На рис. 3 та рис. 4 наведено одержані температурні залежності постійної Холла (рис. 3, а), питомого опору (рис. 3, б) та рухливості (рис. 4) для мікрочастин твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  різного складу (криві 1-7) вирощених методом хімічних транспортних реакцій за механізмом пара-рідина-кристал. Для порівняння також представлені результати цих залежностей для мікрочастин  $InAs$  (А) та  $GaAs$  (В) з близькою концентрацією вільних носіїв заряду.

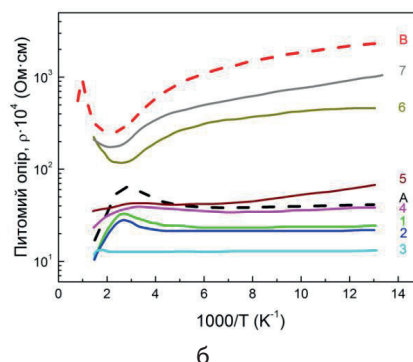
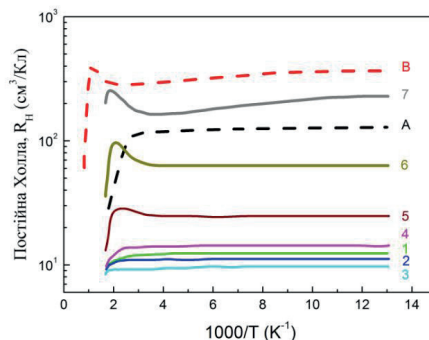


Рис. 3. Температурні залежності: а – постійної Холла; б – питомого опору у кристалах: А –  $InAs$  ( $n = 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>); В –  $GaAs$  ( $n = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>); 1 –  $Ga_{0,32}In_{0,68}As$  ( $n = 4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 2 –  $Ga_{0,35}In_{0,65}As$  ( $n = 6 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 3 –  $Ga_{0,40}In_{0,60}As$  ( $n = 6 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 4 –  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$  ( $n = 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 5 –  $Ga_{0,54}In_{0,46}As$  ( $n = 3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 6 –  $Ga_{0,63}In_{0,37}As$  ( $n = 1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 7 –  $Ga_{0,80}In_{0,20}As$  ( $n = 4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>)

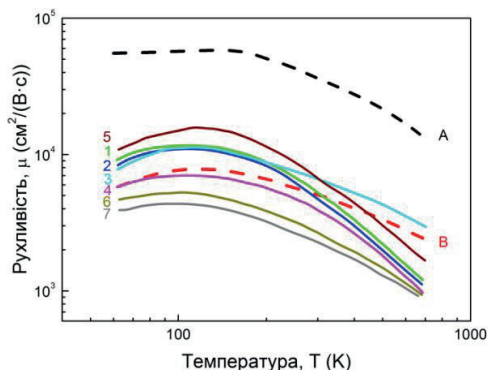


Рис. 4. Температурні залежності рухливості н.з. у кристалах: А – InAs ( $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ); В – GaAs ( $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ); 1 – Ga<sub>0,32</sub>In<sub>0,68</sub>As ( $n = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 2 – Ga<sub>0,35</sub>In<sub>0,65</sub>As ( $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 3 – Ga<sub>0,40</sub>In<sub>0,60</sub>As ( $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 4 – Ga<sub>0,47</sub>In<sub>0,53</sub>As ( $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 5 – Ga<sub>0,54</sub>In<sub>0,46</sub>As ( $n = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 6 – Ga<sub>0,63</sub>In<sub>0,37</sub>As ( $n = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ); 7 – Ga<sub>0,80</sub>In<sub>0,20</sub>As ( $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )

Аналізуючи характер температурних залежностей параметрів та величину рухливості вільних носіїв заряду в зразках твердого розчину Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As, можна сказати, що у всьому діапазоні досліджуваних складів твердого розчину проявляються механізми розсіювання, подібні до механізмів розсіювання у чистому GaAs n-типу провідності. Для таких зразків в області високих температур головним механізмом розсіювання є полярне розсіювання. Із зменшенням температури до області кімнатних температур процес розсіювання добре описується поєднанням механізмів розсіювання на поляризаційних коливаннях ґратки та іонізованих домішках. За нижчих температур розсіювання носіїв заряду може бути описане за допомогою механізму розсіювання на поляризаційних коливаннях ґратки.

### 5. Розрахунок ширини забороненої зони мікрочистотів твердого розчину GaAs-InAs з різним вмістом компонентів

Аналізуючи температурні залежності постійної Холла та питомого опору в області високих температур, де проявляється власна провідність, можна оцінити величину ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу.

Припустимо, що для даних напівпровідників постійна Холла R<sub>H</sub> та концентрація вільних носіїв заряду n<sub>i</sub> в області власної провідності пов'язані співвідношенням:

$$R_H \cong \frac{1}{e \cdot n_i}, \tag{3}$$

де n<sub>i</sub> – концентрація власних носіїв. Рухливість електронів в областях власної та змішаної провідності, набагато більша за рухливість дірок, а тоді ширину забороненої зони напівпровідника можна визначити за рівнянням [7, 8]:

$$E_g^0 = \frac{\Delta \lg \left( \frac{\rho}{\sqrt{\left(1 - \frac{R_H}{R_S}\right)}} \right) \cdot 2 \cdot k}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right) \cdot \lg e}, \tag{4}$$

де ρ – питомий опір, R<sub>H</sub> – постійна Холла, R<sub>S</sub> – значення постійної Холла в області “плато” (область домішкової провідності, де значення коефіцієнта Холла є сталим), T – температура, k – постійна Больцмана.

Результати розрахунку ширини забороненої зони для ниткоподібних мікрочистотів твердого розчину Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As (x=0,3÷0,8) та кристалів GaAs та InAs приведені в табл. 2, а також на рис. 5 (точки 1 – дані розрахунку за рівнянням (4) для зразків, отриманих методом хімічних транспортних реакцій з використанням ПРК-механізму; криві 2, 3 – літературні дані).

Таблиця 2

Ширина забороненої зони для кристалів Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As

N	Зразок	Склад Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As		Ширина забороненої зони, E <sub>g</sub> (eВ)
		x	1-x	
A	InAs	0	1	0,41
1	Ga <sub>0,32</sub> In <sub>0,68</sub> As	0,32	0,68	0,46
2	Ga <sub>0,35</sub> In <sub>0,65</sub> As	0,35	0,65	0,48
3	Ga <sub>0,4</sub> In <sub>0,6</sub> As	0,40	0,60	0,55
4	Ga <sub>0,47</sub> In <sub>0,53</sub> As	0,47	0,53	0,77
5	Ga <sub>0,54</sub> In <sub>0,46</sub> As	0,54	0,46	0,81
6	Ga <sub>0,63</sub> In <sub>0,37</sub> As	0,63	0,37	1,05
7	Ga <sub>0,8</sub> In <sub>0,2</sub> As	0,80	0,20	1,36
B	GaAs	1	0	1,49

Як видно з одержаних результатів (рис. 5, табл. 2), найкращий збіг розрахованих та довідникових даних спостерігається для крайніх випадків: чистих InAs та GaAs. Це свідчить про те, що дана методика, незважаючи на використані припущення та спрощення, дає хороший результат для цих напівпровідникових кристалів, а отже повинна працювати і для твердих розчинів Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As.

Розрахунки ширини забороненої зони для вирощених кристалів твердого розчину Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As показали, що ширина забороненої зони залежить від складу і зростає із збільшенням вмісту галію. Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними та експериментальними даними, приведеними в роботі [11].

Певні розходження отриманих результатів розрахунку ширини забороненої зони для вирощених кристалів твердого розчину із теоретичними даними очевидно пов'язані з тим, що при аналізі температурних залежностей постійної Холла та питомого опору з недостатньою точністю були визначені ділянки переходу до власної провідності. Технічні обмеження не дали можливості провести вимірювання постійної Холла та питомого опору при таких високих температурах, при яких однозначно спостерігається область

власної провідності у вирощених кристалах твердого розчину, що й привело до неточності в розрахунках ширини забороненої зони. Особливо це помітно для зразків із високим вмістом Ga, які характеризуються більш широкою забороненою зоною. Для таких зразків область власної провідності настає при більш високих температурах.

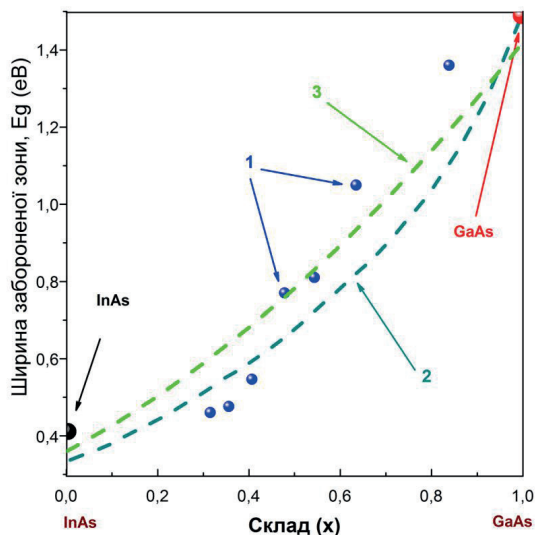


Рис. 5. Залежність ширини забороненої зони від складу твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$ : 1 – залежність для зразків, вирощених методом хімічних транспортних реакцій з використанням ПРК-механізму; 2 – розрахункова залежність ширини ЗЗ, отримана на основі результатів оптичних вимірювань [9]; 3 – теоретична залежність, розрахована за емпіричною формулою [10]

### 6. Дослідження впливу нейтронного опромінення на параметри мікрочисталів твердого розчину $Ga_xIn_{1-x}As$

Дослідження впливу іонізуючого опромінення на мікрочистали твердих розчинів, зокрема  $Ga_xIn_{1-x}As$ , є важливим з точки зору пошуку оптимальних складів таких матеріалів, стійких до дії радіаційного опромінення з метою подальшого використання приладів на їх основі в жорстких радіаційних умовах.

Прогнозування поведінки опромінених напівпровідникових матеріалів базується на їх основних параметрах, зокрема, на величині ширини забороненої зони [12]. В основу даної моделі покладено явище компенсації вихідної провідності матеріалу в результаті опромінення. При цьому тип провідності опроміненого напівпровідника визначається мінімальною енергетичною щільною між рівнем  $\langle E_g \rangle / 2$ , в якому напрямку і відбувається зсув рівня Фермі під дією опромінення, та найближчим до нього екстремумом зони провідності або валентної зони, тобто залежить від особливостей енергетичного спектру самого матеріалу.

Так для матеріалів GaAs та InAs значення «граничного» рівня Фермі  $F_{lim}$  є близькими:  $F_{lim}(InAs) = E_V + 0,52$  eV,  $F_{lim}(GaAs) = E_V + 0,6$  eV. При цьому в результаті опромінення матеріали отримують різні власти-

вості:  $n^+$  ( $n_{sat} \approx 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>,  $\rho_{sat} \approx 10^{-3}$  Ом·см) – у випадку InAs та і-тип провідності ( $\rho_{sat} \approx 10^{(8-9)}$  Ом·см) у випадку GaAs. Відмінність електрофізичних характеристик InAs та GaAs після опромінення викликана тим, що положення  $F_{lim} (\equiv \langle E_g \rangle / 2)$  відповідає області дозволеної енергії зони провідності у випадку InAs, ширина забороненої зони якого складає 0,36 eV, але близьке до  $\langle E_g \rangle / 2$  для GaAs (рис. 6).

Величина  $\langle E_g \rangle / 2$  добре узгоджується із значенням рівня локальної електронейтральності  $E_{lnl}$  напівпровідника, яке можна визначити з умови його електричної нейтральності [12].

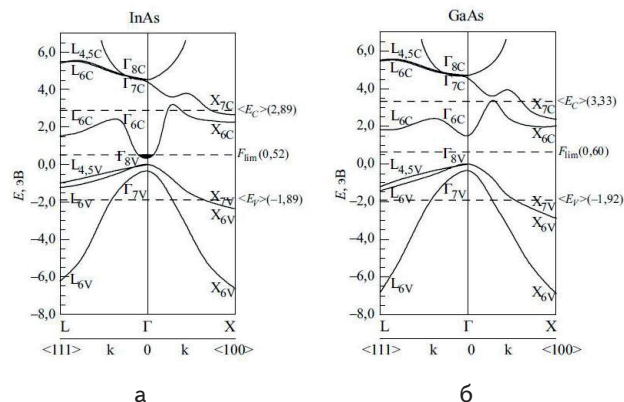


Рис. 6. Електронні зонні спектри а – InAs та б – GaAs, розрахункові значення  $\langle E_c \rangle$ ,  $\langle E_v \rangle$  та експериментальні значення величини  $F_{lim} (\equiv \langle E_g \rangle / 2)$  (штрихові прямі). Відлік всіх значень відбувається від стелі валентної зони

Проведений розрахунок рівня локальної електронейтральності для твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  різного складу показав, що з точки зору радіаційної стійкості інтерес викликають розчини зі складом  $x \leq 0,6$ , які при опроміненні високоенергетичними частинками мають набувати  $n^+$ - та  $p$ -типу провідності.

Для підтвердження розрахованої залежності були проведені дослідження впливу опромінення повним спектром реакторних нейтронів на параметри мікрочисталів твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  з різним складом компонентів.

Дослідження проводились в реакторі ВВР-м в Петербурзькому інституті ядерної фізики (м. Гатчина, Росія). У такого типу реакторів співвідношення кількості теплових нейтронів до кількості швидких нейтронів складає 10:1. Крім того, в повному потоці присутня значна кількість резонансних (проміжних) нейтронів, вплив яких на In-вмісні матеріали є суттєвим [13]. Опромінення проводили при інтенсивності потоку нейтронів  $\phi = 10^{10}$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> до флюєнсів  $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$  н·см<sup>-2</sup> та  $\Phi = 7 \cdot 10^{15}$  н·см<sup>-2</sup> при температурі опромінення 60°C. Для дослідження були відібрані мікрочистали твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$  з різним вмістом бінарних компонентів ( $x = 0,2 \div 0,8$ ) з концентрацією вільних носіїв заряду  $(0,8 \div 3,5) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Для порівняння були також відібрані мікрочистали InAs та GaAs з відповідною концентрацією вільних носіїв заряду.

Оцінка радіаційної стійкості досліджуваних зразків проводилась шляхом визначення відносної зміни концентрації вільних носіїв заряду ( $n$ ) до та після опромінення. Стабільність концентрації вільних

носіїв заряду визначає стабільність чутливості ( $S$ ) сенсорів магнітного поля в радіаційних умовах.

Вимірювання зразків проводили до та після опромінення зі збереженням всіх умов вимірювань ( $T = 30^\circ\text{C}$ ,  $V = 0,670$  мТл) на прецизійному стенді TI-3 на базі установки HMS 7504 (США), відносна похибка визначення зміни концентрації носіїв заряду матеріалу ( $\Delta n/n$ ) не перевищувала 0,1 %.

Результати проведених нами досліджень представлені на рис. 7.

Як показали експериментальні результати, спостерігається лінійна залежність зміни концентрації вільних носіїв заряду від складу твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ . Зразки з високою кількістю In у складі ( $x \leq 0,6$ ) характеризуються зростанням концентрації вільних носіїв заряду під дією нейтронів, в той же час для зразків з максимальним вмістом Ga ( $x \geq 0,6$ ) спостерігається зворотна залежність – для них характерним є зменшення концентрації вільних носіїв заряду під дією нейтронного опромінення.

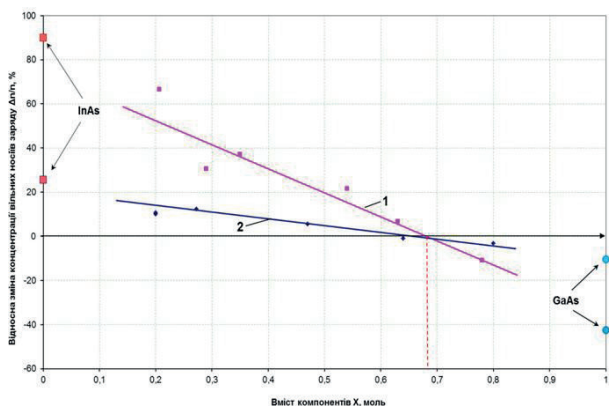


Рис.7. Відносна зміна концентрації вільних носіїв заряду під дією нейтронного опромінення для мікрочисталів  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  з різним вмістом компонентів ( $0,2 < x < 0,8$ ) при двох флюенсах нейтронів (крива 1 –  $\Phi_n = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; крива 2 –  $\Phi_n = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) та мікрочисталів InAs і GaAs з відповідною концентрацією вільних носіїв заряду, опромінені за тих же умов

Таку різницю в поведінці кристалів твердого розчину в залежності від його складу можна пояснити різницею у механізмі впливу нейтронів на параметри InAs та GaAs. Так для InAs опромінення повним спектром реакторних нейтронів приводить до зростання кількості вільних носіїв заряду одночасно за двома механізмами – за рахунок ефективного ядерного легування на теплових та резонансних нейтронах (коефіцієнт ядерного легування InAs на теплових нейтронах  $\alpha = 3,45$ ) та за рахунок утворення радіаційних дефектів донорного типу на швидких нейтронах. Для таких матеріалів характерним буде зростання вільних носіїв заряду під дією нейтронного опромінення (точки InAs, рис. 7). Така ж поведінка спостерігається і для кристалів з масовою часткою InAs понад 40 % ( $x < 0,6$ ) (рис. 7). В GaAs під дією опромінення нейтронами ядерне легування є менш ефективне (коефіцієнт ядерного легування GaAs на теплових нейтронах  $\alpha = 0,17$ ), при цьому дуже активно відбувається утворення радіаційних дефектів акцепторного типу,

які у даному матеріалі анігілюють слабо [14, 15]. Тому при опроміненні повним спектром реакторних нейтронів для n-GaAs спостерігається зменшення концентрації вільних носіїв заряду (точки GaAs, рис. 7). Зростання вмісту GaAs ( $x > 0,7$ ) у твердому розчині приводить до зменшення кількості донорних рівнів, що утворюються в матеріалі за рахунок ядерного легування. Зміна коефіцієнта ядерного легування твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  носить лінійний характер і може бути розрахована за рівнянням:

$$\alpha = 0,17 \cdot x + 3,45(1-x), \tag{5}$$

де  $x$  – мольний вміст GaAs у твердому розчині.

Крім того, із зміною кількості GaAs та InAs, в матеріалі змінюється співвідношення радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів, утворених під дією швидких нейтронів, що і приводить до зменшення концентрації вільних носіїв заряду в опромінену матеріалі ( $\Delta n/n < 0$ ), а величина цього зменшення лінійно залежить від вмісту GaAs (рис. 7).

Отримані результати показали хорошу відповідність розрахункових оцінок поведінки кристалів твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  під дією нейтронного опромінення та експериментальних даних.

## 7. Висновки

В результаті проведених встановлено, що величина концентрації вільних носіїв заряду та їх рухливість для вирощених кристалів твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  залежить від складу і зменшується із збільшенням галієвої складової.

Встановлено, що характер температурних залежностей постійної Холла, питомого опору та рухливості вільних носіїв заряду визначається складом твердого розчину: при вмісті галієвої складової більше як 50 % характер температурних залежностей постійної Холла та питомого опору є близький до характеру таких залежностей для чистого GaAs n-типу провідності. Такі кристали твердого розчину володіють кристалографічною структурою та структурою енергетичних зон, близькими до кристалів арсеніду галію n-типу провідності. При цьому ширина забороненої зони вирощених мікрочисталів твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  так само залежить від їх складу і збільшується із збільшенням галієвої складової.

Цікавими з точки зору використання для сенсорів, що працюють в радіаційних умовах, є тверді розчини  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  зі складом компонентів  $x \leq 0,6$ , що було підтверджено експериментально.

Широкий діапазон складу, що дозволяє отримувати матеріал із різними електрофізичними властивостями, разом із результатами радіаційного дослідження вказують на перспективність практичного використання даного матеріалу в умовах радіаційного навантаження. При цьому параметри матеріалу для радіаційностійких сенсорів слід підбирати з врахуванням умов опромінення (спектру потоку нейтронів та температури опромінення).

## Література

1. Kawashima, Toshiyuki Thermal- and Spectral-Characteristics of High-Power Quasi-Continuous Wave 940-nm InGaAs Diode Laser Arrays [Text] / Toshiyuki Kawashima, Tomokazu Ichii, Takeshi Kanzaki, Masanobu Yamanaka, Yasukazu Izawa, Sadao Nakai, Hirofumi Kan // *Optical Review*. – 2000. – Vol. 7, Is. 6. – P 520-524
2. Liu, G. T. The Influence of Quantum-Well Composition on the Performance of Quantum Dot Lasers Using InAs/InGaAs Dots-in-a-Well (DWELL) Structures [Text] / G. T. Liu, A. Stintz, H. Li, T. C. Newell, A. L. Gray, P. M. Varangis, K. J. Malloy, L. F. Lester // *IEEE J. OF QUANTUM ELECTRONICS*. – 2000. – Vol. 36, № 11. – P 1272-1279.
3. Dowd, P. Long wavelength (1.3 and 1.5  $\mu\text{m}$ ) photoluminescence from InGaAs/GaPAsSb quantum wells grown on GaAs [Text] / P. Dowd, W. Braun, David J. Smith, C.M. Ryu, C.-Z. Guo, S. L. Chen, U. Koelle, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 75, Is. 9. – P 1267-1269.
4. Брудный, В. Локальная электронейтральность и закрепление химического потенциала в твердых растворах соединений III–V: границы раздела, радиационные эффекты [Текст] / В. Н. Брудный, С. Н. Гриняев // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 315-318.
5. Дубровский, В. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применения. Обзор [Текст] / В. Г. Дубровский, Г. Э. Цыблин, В. М. Устинов // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43, Вып. 12. – С. 1585-1628.
6. Большакова, І. Властивості віскерів твердого розчину  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ , вирощених методом хімічних транспортних реакцій з газової фази [Текст] / І. А. Большакова, Я. Я. Кость, О. Ю. Макидо, Р. М. Стецко, Ф. М. Шуригін // *Вісник НУ „Львівська Політехніка”. Електроніка*. – 2013. – № 764. – С. 112-118.
7. Большакова, І. Дослідження температурної залежності параметрів легованих мікрочастини арсеніду індію в інтервалі температур 77÷525 К [Текст] / І. А. Большакова, Д. М. Заячук, Т. А. Москоvecь, О. Ю. Макидо, Ф. М. Шуригін // *Вісник НУ „Львівська політехніка”. Електроніка*. – 2003. – № 482. – С. 86-91.
8. Bolshakova, I. Mathematical simulation, synthesis, characterization and application of indium arsenide whiskers [Text] / I. Bolshakova, Y. Kost, E. Makido, F. Shurygin // *Journal of Crystal Growth*. – 2008. – Vol. 310, Is. 7-9. – P. 2254-2259.
9. Маделунг, О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп [Текст]: Перевод с английского / О. Маделунг. – М. : Мир 1967. – 480 с.
10. Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Биологические системы. Характеристики и свойства [Электронный ресурс]. – NSM Archive. Physical properties of Gallium Indium Arsenide (GaInAs). База даних ФТИ ім. Иоффе РАН. – Режим доступу <http://www.matprop.ru/GaInAs>.
11. Adachi, S. Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors [Text] / S. Adachi // John Wiley & Sons, 2009. – 400 p.
12. Брудный, В. Модель самокомпенсации и стабилизации уровня Ферми в облученных полупроводниках [Текст] / В. Н. Брудный, Н. Г. Колин, Л. С. Смирнов // *Физика и техника полупроводников*. – 2007. – Т. 41, № 9. – С. 1031-1040.
13. Большакова, І. Влияние нейтронного облучения на свойства нитевидных микрокристаллов n-InSb [Текст] / І. А. Большакова, В. М. Бойко, В. Н. Брудный, І. В. Каменская, Н. Г. Колин, Е. Ю. Макидо, Т. А. Москоvecь, Д. І. Меркурисов // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39, № 7. – С. 814-819.
14. Kolin, N. Neutron-Transmutation Doping and Radiation Modification of Semiconductors: Current Status and Outlook [Text] / N. Kolin // *Russian Physics Journal*. – 2003. – Vol. 45, № 6. – P. 543-551.
15. Брудный, В.Н. Электрофизические и оптические свойства InP, облученного большими интегральными потоками нейтронов [Текст] / В. Н. Брудный, Н. Г. Колин, Д. І. Меркурисов, В. А. Новиков // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39, № 5. – С. 528-534.