

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТОНКОПЛІВКОВІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

І.А. Большакова^{a, *}, Л. Вієрербл^b, І. Дюран^c, В.Е. Єрашок^a, Н.В. Ковальова^a,
О.Ю. Макідо^a, А.П. Мороз^a, Ф.М. Шурігін^a

^a Національний університет “Львівська політехніка”

(вул. С.Бандери 12, Львів, 79013, Україна)

^b Дослідницький центр Реж

(Реж, Чеська республіка)

^c Інститут фізики плазми АН ЧР

(За Слованкою 3, 182 00 Прага 8, Чеська республіка)

(Отримано 16 листопада 2011 р.)

Досліджено вплив нейтронного опромінення на параметри тонкоплівкових сенсорів магнітного поля на основі InAs та InSb. Визначено вплив спектра нейтронів на величину зміни параметрів сенсорів. Наведені результати відпалу радіаційних дефектів опромінених зразків. Показано, що зміна параметрів сенсорів на основі багатошарових структур визначається не тільки поведінкою матеріалу робочого шару, а також впливом нейтронного опромінення на властивості буферних шарів цієї структури.

Ключові слова: напівпровідникові сенсори, арсенід індію, антимонід індію, багатошарові гетероструктури, нейтронне опромінення

УДК: 621.315.592

ВСТУП

Напівпровідникові холлівські сенсори є перспективними для підвищення точності вимірювання квазістаціонарного магнітного поля в термоядерних реакторах при тривалих імпульсах горіння плазми [1].

Однак використання напівпровідникових сенсорів в термоядерних реакторах висуває вимоги щодо стабільності їх параметрів у радіаційних та температурних умовах цих установок. Попередні дослідження, проведені в Лабораторії магнітних сенсорів на мікромонокристалах напівпровідникових сполук InSb та InAs та твердих розчинів $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$, показали можливість створення радіаційно-стійких сенсорів на основі цих матеріалів, легованих комплексами домішок, склад та співвідношення яких вибираються з врахуванням енергетичного спектра опромінюючих нейтронів [2, 3].

У цій роботі аналізуються результати дослідження тонкоплівкових сенсорів на основі напівпровідникових матеріалів InSb та InAs, виготовлених методами молекулярно-променевої епітаксії та магнетронного розпилення на підкладках GaAs та Al_2O_3 . Тонкі плівки InSb являють собою просту гетероструктуру InSb/i-GaAs, а тонкі плівки InAs виготовлені з використанням декількох буферних шарів для узгодження параметрів ґратки плівки з підкладкою.

*Автор-респондент

1. Умови експерименту

Дослідження впливу нейтронного опромінення на тонкоплівкові сенсори, виготовлені на основі In-вмісних напівпровідникових матеріалів InSb та InAs, проводились в реакторі LVR-15 в Дослідницькому центрі Реж (Řež, Czech Republic). У такого типу реакторів кількість теплових (повільних) нейтронів у потоці значно перевищує кількість швидких. Крім того, в повному потоці присутня також значна кількість резонансних (проміжних) нейтронів. Експеримент з опромінення проводили в каналі DONA, розподіл нейтронів по енергіях в цьому каналі наведений в табл. 1.

У табл. 1 також наведений розподіл нейтронів за енергіями за умови екранування зразків від теплових нейтронів за допомогою кадмієвого екрана товщиною 0,5 мм.

Як видно з табл. 1, використання Cd фольги товщиною 0,5 мм приводить до екранування потоків теплових нейтронів приблизно на 95% та змінює співвідношення теплових (φ_t) та швидких (φ_f) нейтронів з $\varphi_t/\varphi_f = 9$ до $\varphi_t/\varphi_f = 0,3$. Особливістю нейтронного потоку цього реактора є велика інтенсивність потоку резонансних нейтронів, кількість яких є величиною одного порядку з кількістю швидких нейтронів у потоці.

Таблиця 1

Розподіл потоків нейтронів у потоці за енергіями в каналі DONA

Енергії нейтронів	Повний потік нейтронів		Потік нейтронів при Cd-му екрануванні	
	Розподіл нейтронів за енергіями, %	Інтенсивність потоку нейтронів φ , $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Розподіл нейтронів за енергіями, %	Інтенсивність потоку нейтронів φ , $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
Теплові $E = 0,0 - 0,5\text{eV}$	80,4	$2,1 \cdot 10^{13}$	13,9	$8,9 \cdot 10^{11}$
Резонансні $E = 0,5\text{eV} - 0,1\text{MeV}$	10,5	$2,7 \cdot 10^{12}$	45,1	$2,9 \cdot 10^{12}$
Швидкі $E = 0,1\text{MeV} - 20\text{MeV}$	9,1	$2,3 \cdot 10^{12}$	41,0	$2,6 \cdot 10^{12}$
Всього	100	$2,6 \cdot 10^{13}$	100	$6,4 \cdot 10^{12}$

З метою визначення впливу спектра нейтронів на зміну параметрів сенсорів опромінення досліджуваних зразків проводили як повним спектром реакторних нейтронів, так і за допомогою кадмєвих екранів для зменшення кількості атомів олова, що вводяться в матеріал у результаті трансмутаційних реакцій.

Відомо [2], що для In-вмісних матеріалів у разі опромінення повним спектром реакторних нейтронів зміна параметрів відбувається за рахунок перебігу двох процесів: 1) утворення радіаційних дефектів під дією швидких нейтронів, атомів віддачі та γ -складової випромінювання реактора; 2) утворення атомів легуючої домішки за рахунок трансмутаційних реакцій, що відбуваються під час взаємодії теплових та проміжних нейтронів з атомами In основної речовини.

При цьому висока ефективність ядерного легування In-вмісних сполук пов'язана з великим значенням перетину поглинання теплових нейтронів атомами індію [4, 5]. Перетин захоплення теплових нейтронів атомами індію становить 190 барн, а атомами сурми та арсену набагато менший – 5,5 барн та 5,4 барн відповідно. Тому під час перебігу цих ядерних реакцій основним кінцевим продуктом як для InSb, так і для InAs, є олово. Так від всіх утворених ізотопів в результаті трансмутаційних реакцій для InSb атоми олова становлять 97,5%, для InAs – 97,2% [6, 7].

Для розрахунку концентрації утворених атомів олова, введених в результаті ядерних реакцій на теплових нейтронах, використовується рівняння [6]:

$$N_i = N_0 \cdot k_i \cdot \sigma_i \cdot F_s, \quad (1)$$

де N_0 – кількість атомів природної суміші ізотопів в одиниці об'єму речовини; k_i – вміст ізотопу; σ_i – перетин поглинання теплових нейтронів ізотопом; F_s – флюенс теплових нейтронів.

Значення N_0 , k_i та σ_i є константами для даного матеріалу, їх добуток – це коефіцієнт легування (α) даного матеріалу в результаті ядерних реакцій.

За розрахунком за формулою (1) ефективність

ядерного легування становить для антимоніду індію:

$$N_{Sn} = 2,82 \cdot F_s, \quad (2)$$

для арсеніду індію:

$$N_{Sn} = 3,45 \cdot F_s, \quad (3)$$

Крім того, для атомів In характерним є поглинання резонансних нейтронів з енергією 1,46 еВ (перетин поглинання $2,2 \cdot 10^4$ барн), що приводить до утворення в матеріалі додаткової кількості легуючої домішки Sn навіть за умови повного екранування теплових нейтронів кадмєвим екраном [8].

Опромінювали повним потоком нейтронів до флюенсу $\Phi = 1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, з використанням Cd-екранів – до флюенсу $\Phi = 3,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Контейнери із досліджуваними зразками сенсорів в каналі DONA знаходились у воді, яка регулює температуру експерименту. У цьому експерименті температура під час опромінення становила 90°C .

II. Результати експерименту

Для дослідження були відібрані чотири групи тонкоплівкових сенсорів на основі напівпровідникових матеріалів InSb та InAs. Сенсори на основі InSb відрізнялись рівнем легування півки та відповідною концентрацією вільних носіїв заряду ($2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ та $1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Дві групи сенсорів на основі InAs відрізнялись між собою матеріалом підкладки: сапфір та напівізолюючий GaAs, значення вихідних концентрацій були близькими ($\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

A Дослідження сенсорів на основі InSb

Як показали результати дослідження, для всіх опромінених сенсорів на основі InSb спостерігається зростання концентрації носіїв заряду матеріалу чутливого елемента та зменшення чутливості сенсорів за одночасного зменшення питомого опору та рухливості носіїв заряду (табл. 2).

Зміна параметрів матеріалу чутливого елемента опромінених сенсорів на основі InSb

№ з/п	Матеріал чутливого елемента	Наявність екранування	Концентрація носіїв заряду n , см^{-3}	Чутливість при $I_{\text{ном}} S$, мВ/Тл	Питомий опір $\rho \times 10^4$, Ом·см	Рухливість носіїв заряду μ , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Флюенс нейтронів Φ , $\text{н}/\text{см}^2$	Співвідношення потоків теплових та швидких нейтронів φ_t/φ_f
1	InSb	До опромінення	$2,4 \cdot 10^{16}$	670	120	21100	Не опромінені	
2	InSb	Cd екран	$5,5 \cdot 10^{17}$	30	21	5500	$3,2 \cdot 10^{17}$	$\varphi_t/\varphi_f = 0,3$
3	InSb	Повний потік	$2,3 \cdot 10^{18}$	10	9	3000	$1,3 \cdot 10^{18}$	$\varphi_t/\varphi_f = 9$
4	InSb	До опромінення	$1,5 \cdot 10^{17}$	450	27	15700	Не опромінені	
5	InSb	Cd екран	$3,8 \cdot 10^{17}$	180	39	4400	$3,2 \cdot 10^{17}$	$\varphi_t/\varphi_f = 0,3$
6	InSb	Повний потік	$1,8 \cdot 10^{18}$	55	19	2700	$1,3 \cdot 10^{18}$	$\varphi_t/\varphi_f = 9$

Максимальне зростання концентрації вільних носіїв заряду та відповідне зменшення чутливості після нейтронного опромінення спостерігається для зразків InSb з низьким рівнем легування матеріалу чутливого елемента ($n_0 = 2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T = 300 \text{ K}$) після опромінення повним спектром реакторних нейтронів (співвідношення теплових (φ_t) та швидких (φ_f) нейтронів $\varphi_t/\varphi_f = 9$). Абсолютна зміна концентрації носіїв заряду матеріалу чутливого елемента становить $\Delta n \approx 2,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що пов'язане передусім із ядерним легуванням матеріалу тепловими нейтронами. При використанні Cd-пенала концентрація носіїв заряду теж зростає, але зміна концентрації при цьому значно менша: $\Delta n \approx 5,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Різниця між значеннями зміни концентрацій носіїв заряду для зразків, опромінених при різних співвідношеннях теплових та швидких нейтронів (#2 та #3 табл. 2), тобто при різних значеннях флюенсу теплових нейтронів, узгоджується з формулою (1), що підтверджує переважаючий вплив теплових нейтронів на зміну параметрів цих сенсорів.

У результаті взаємодії InSb з швидкими нейтронами в матеріал сенсора одночасно вводяться радіаційні дефекти як донорного, так і акцепторного типів, а ефективність їх впливу на електрофізичні властивості матеріалу залежить від вихідного рівня легування [2]. Для зразків InSb з власною концентрацією носіїв заряду (зразок #1) кількості утворених радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів рівнозначні, а подальше зростання вихідної концентрації носіїв заряду за рахунок ядерного легування приводить до зростання впливу радіаційних дефектів акцепторного типу.

Тобто незалежно від співвідношення потоків теплових та швидких нейтронів за наявності великої

кількості резонансних нейтронів для сенсорів InSb з низьким рівнем легування матеріалу чутливого елемента основний вплив на зміну параметрів має ядерне легування на теплових та резонансних нейтронах, і в меншому ступені впливають радіаційні дефекти, утворені швидкими нейтронами.

Для зразків з вищим значенням вихідної концентрації носіїв заряду $n_0 = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при опроміненні з Cd-екраном ($\varphi_t/\varphi_f = 0,3$) спостерігається незначне зростання концентрації носіїв заряду ($\Delta n \approx 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), питомий опір зразків зростає, рухливість носіїв заряду зменшується. Це свідчить про те, що переважний вплив на зміну параметрів цих сенсорів мають радіаційні дефекти, утворені швидкими нейтронами. Зростання концентрації носіїв заряду матеріалу, що спостерігається за таких умов опромінення (зразок #5 табл.3), підтверджує помітний вплив резонансних нейтронів, кількість яких в загальному потоці нейтронів для реактора LVR-15 є істотною (див. табл. 1).

Під час опромінення ідентичних зразків повним спектром реакторних нейтронів ($\varphi_t/\varphi_f = 9$) за однакової тривалості експозиції концентрація носіїв заряду зростає (зразок #6 табл. 3 $\Delta n \approx 1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), питомий опір та рухливість носіїв заряду при цьому зменшуються. Отже, параметри матеріалу чутливого елемента в основному визначаються електрично-активними атомами олова, що вводяться в результаті ядерних реакцій на теплових та резонансних нейтронах, та радіаційними дефектами акцепторного типу, утвореними на швидких нейтронах.

Відомо, що для In-вмісних матеріалів відпал основної частини радіаційних дефектів точкового типу відбувається при температурах $100 - 250^\circ\text{C}$ [5]. Тому проведення відпалу при температурах 200°C

має спричинити до зростання як концентрації носіїв заряду, так і їх рухливості. Відпал радіаційних де-

фектів проводили у вакуумі при температурі 200°C протягом 20 хв., результати якого наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Зміна параметрів опромінених сенсорів на основі InSb після відпалу

№ з/п	Флюенс нейтронів Φ , н/см ²	Після опромінення			Після відпалу ($T = 200^{\circ}\text{C}$, 20 хв.)		
		Концентрація носіїв заряду n , см ⁻³	Чутливість при $I_{\text{ном}} S$, мВ/Тл	Рухливість носіїв заряду μ , см ² /Вс	Концентрація носіїв заряду n , см ⁻³	Чутливість при $I_{\text{ном}} S$, мВ/Тл	Рухливість носіїв заряду μ , см ² /Вс
2	$3,2 \cdot 10^{17}$	$5,5 \cdot 10^{17}$	30	5500	$8,6 \cdot 10^{17}$	19	8500
3	$1,3 \cdot 10^{18}$	$2,3 \cdot 10^{18}$	10	3000	$4,0 \cdot 10^{18}$	4	5500
5	$3,2 \cdot 10^{17}$	$3,8 \cdot 10^{17}$	180	4400	$5,0 \cdot 10^{17}$	130	5600
6	$1,3 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	55	2700	$1,6 \cdot 10^{18}$	40	3400

Для всіх опромінених зразків InSb спостерігається одночасне зростання концентрації вільних носіїв заряду матеріалу та їх рухливості. До того ж після відпалу зростання концентрації вільних носіїв заряду більше для зразків, що отримали більшу дозу теплових нейтронів. Так для зразків 2 та 3 зміна концентрації становить відповідно, $\Delta n = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³ та $\Delta n = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Таку різницю в зміні концентрації відпалом тільки радіаційних дефектів акцепторного типу пояснити неможливо. Імовірно, що в процесі проведення відпалу відбувається не тільки відпал радіаційних дефектів, а також активація зв'язаних неактивних атомів донорної домішки олова, введеної в наслідок ядерного легування [5–7]. Для зразків 5 та 6 відміна також спостерігається, але незначна – $\Delta n = 1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ та $\Delta n = 4 \cdot 10^{17}$ см⁻³, відповідно. Така відмінність поведінки спричинена вихідни-

ми параметрами цих сенсорів та пов'язаною із ними зміною кількості утворених радіаційних дефектів у матеріалі.

Можна зробити висновок, що переважний вплив на зміну параметрів сенсорів InSb під час опромінення повним спектром реакторних нейтронів матимуть саме теплові нейтрони та пов'язане із ними ядерне легування матеріалу сенсора.

В Дослідження опромінених сенсорів на основі InAs

Опромінення реакторними нейтронами сенсорів на основі InAs приводить до зростання концентрації носіїв заряду матеріалу чутливого елемента, зменшення його питомого опору та відповідного зменшення чутливості сенсора (табл. 4).

Таблиця 4

Зміна параметрів матеріалу чутливого елемента опромінених сенсорів на основі InAs

№ з/п	Матеріал чутливого елемента	Наявність екранування	Концентрація носіїв заряду n , см ⁻³	Чутливість при $I_{\text{ном}} S$, мВ/Тл	Питомий опір $\rho \times 10^4$, Ом·см	Рухливість носіїв заряду μ , см ² /Вс	Флюенс нейтронів Φ , н/см ²	Співвідношення потоків теплових та швидких нейтронів φ_t/φ_f
1	InAs	До опромінення	$1,6 \cdot 10^{18}$	300	5,8	7000	Не опромінені	
2	InAs	Cd екран	$9,8 \cdot 10^{18}$	50	1,9	3600	$3,2 \cdot 10^{17}$	$\varphi_t/\varphi_f = 0,3$
3	InAs	Повний потік	$2,3 \cdot 10^{19}$	20	1,0	2600	$1,3 \cdot 10^{18}$	$\varphi_t/\varphi_f = 9$
4	InAs	До опромінення	$2,0 \cdot 10^{18}$	180	6,7	4700	Не опромінені	
5	InAs	Cd екран	$6,6 \cdot 10^{18}$	53	3,5	2700	$3,2 \cdot 10^{17}$	$\varphi_t/\varphi_f = 0,3$
6	InAs	Повний потік	$1,8 \cdot 10^{19}$	20	1,6	2000	$1,3 \cdot 10^{18}$	$\varphi_t/\varphi_f = 9$

Для InAs залежність величини зміни чутливості сенсорів від спектра реакторних нейтронів, тобто від співвідношення φ_t/φ_f , буде проявлятися слабо, що пов'язано із особливостями механізмів дефектоутворення в InAs під час його опромінення.

Так само як і в InSb, в InAs у разі взаємодії із тепловими нейтронами відбувається легування матеріалу донорною домішкою оловом за рахунок трансмутаційних перетворень $\text{In} \rightarrow \text{Sn}$. Однак на відміну від InSb, під час взаємодії із швидкими нейтронами в InAs з концентрацією носіїв заряду $n \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

відбувається утворення радіаційних дефектів переважно донорного типу [9, 10]. Тобто для цього матеріалу, на відміну від InSb, взаємодія як з тепловими, так і зі швидкими нейтронами, приводить до зростання концентрації вільних носіїв заряду та зменшення чутливості сенсора. Тому проведений ізохронно-ізотермічний відпал опромінених зразків InAs, хоча і призводить до незначного зростання рухливості носіїв заряду, що вказує на відпал невеликої кількості точкових радіаційних дефектів, на зміну параметрів матеріалу істотно не впливає (табл. 5) [4, 7].

Таблиця 5

Зміна параметрів опромінених сенсорів на основі InAs після відпалу

№ з/п	Флюенс нейтронів Φ , н/см^2	Після опромінення			Після відпалу ($T = 200^\circ\text{C}$, 20 хв.)		
		Концентрація носіїв заряду n , см^{-3}	Чутливість при $I_{\text{ном}}$ S, мВ/Тл	Рухливість носіїв заряду μ , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Концентрація носіїв заряду n , см^{-3}	Чутливість при $I_{\text{ном}}$ S, мВ/Тл	Рухливість носіїв заряду μ , $\text{см}^2/\text{Вс}$
2	$3,2 \cdot 10^{17}$	$9,8 \cdot 10^{18}$	50	3600	$9,8 \cdot 10^{18}$	49	3800
3	$1,3 \cdot 10^{18}$	$2,3 \cdot 10^{19}$	20	2600	$2,4 \cdot 10^{19}$	19	2800
5	$3,2 \cdot 10^{17}$	$6,6 \cdot 10^{18}$	53	2700	$6,8 \cdot 10^{18}$	52	2800
6	$1,3 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	20	2000	$1,9 \cdot 10^{19}$	19	2200

До того ж відомо [9, 10], що в сильно легуваному InAs ($n \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в умовах “сильного” опромінення (високі флюенси) треба очікувати стабілізацію параметрів в опромінених зразках. У цих роботах було показано, що за умов “сильного” опромінення для InAs рівень Фермі стабілізується в області дозволених енергій зони провідності поблизу $E_V + (0,51 - 0,55) \text{ еВ}$ [9, 10], що відповідає n^+ -типу провідності з концентрацією вільних носіїв заряду $n^+ \approx (2 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Це пов'язано із властивостями даного напівпровідникового матеріалу, для якого співвідношення кількості утворених радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів залежить від кон-

центрації вільних носіїв заряду. У зразках з вихідною концентрацією вільних носіїв заряду $n < 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ утворюються радіаційні дефекти переважно донорного типу, в той же час у зразках з вихідною концентрацією $n > 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ переважають акцептори, а закріплення рівня Фермі під дією опромінення є результатом взаємної компенсації всього ансамблю дефектів донорного та акцепторного типів. Концентрацію вільних носіїв заряду $(2 - 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в опромінених зразках InAs можна вважати граничною, при якій настає закріплення рівня Фермі і стабілізація чутливості сенсорів.

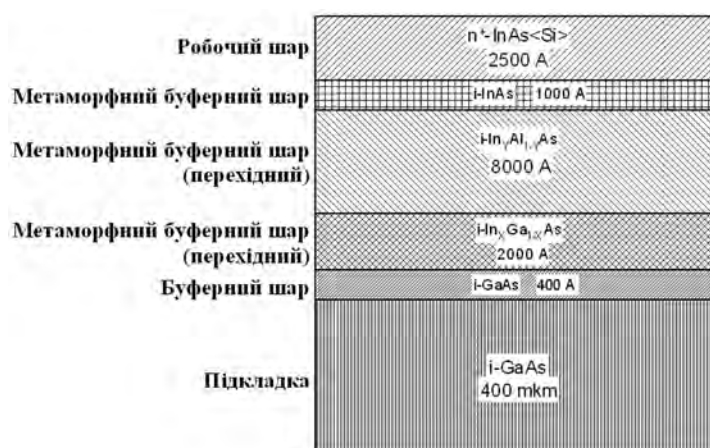


Рис. 1. Структура тонкоплівкового сенсора InAs

Однак значення отриманої концентрації вільних носіїв в дослідних зразках (див. табл. 4) значно перевищують граничну концентрацію для цього матеріалу. Розбіжність між даними робіт [7, 9, 10] Коліна і Брудного та отриманими результатами, очевидно, пов'язана з особливостями поведінки складної структури тонкоплівкових шарів InAs (зразки #3 та #4), в якій між робочим шаром плівки InAs та підкладкою GaAs розташовані буферні шари i-InAs, i-In_xAl_{1-x}As, i-In_xGa_{1-x}As (рис. 1).

Провідність в цих проміжних шарах збільшується з накопиченням дози опромінення через утворення в них радіаційних дефектів донорного типу, що приводить до виникнення “паразитних” струмів розтікання і, як наслідок, до зменшення чутливості сенсора. Отже, зменшення чутливості сенсорів на основі InAs із структурою буферних шарів не пов'язане зі зміною концентрації носіїв заряду і наведені в табл. 4 значення кінцевої концентрації не відповідають її реальному значенню.

Отже, використання тонкоплівкових сенсорів на основі InAs, виготовлених з буферними шарами, не є

ефективним в радіаційних умовах.

Висновки

Під дією нейтронного опромінення для сенсорів на основі тонких плівок InSb та InAs спостерігається зростання концентрації носіїв заряду матеріалу чутливого елементу та зменшення чутливості сенсора.

Співвідношення потоків швидких та теплових нейтронів в спектрі реакторних нейтронів істотно впливає на величину та характер зміни чутливості сенсора на основі InSb, в той же час вплив цього фактора на зміну чутливості сенсорів на основі InAs практично не спостерігається.

Визначено, що для складних багатошарових гетероструктур під дією нейтронного опромінення відбувається зміна параметрів не лише активного шару, а й проміжних метабуферних шарів. Використання напівпровідникових багатошарових гетероструктур під радіаційним навантаженням значно ускладнює прогнозування зміни їх параметрів під дією опромінення і не є ефективним для сенсорів магнітного поля.

Література

- [1] G. Vayakis, C. Walker. Magnetic Diagnostics for ITER/BPX plasmas // *Rev. Sci. Instrum.* **74**(4), (2003). 9 p.
- [2] Большакова И.А., Бойко В.М., Брудный В.Н., Каменская И.В. и др. Влияние нейтронного облучения на свойства нитевидных микрокристаллов n-InSb // *Физика и техника полупроводников.* **39**(7), (2005). 814–819.
- [3] Большакова І.А., Гумен І.С., Ковальова Н.В., Макідо О.Ю. та ін. Дослідження впливу температури опромінення на зміну параметрів напівпровідникових сенсорів магнітного поля на основі InSb та InAs // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська Політехніка”. Електроніка.* **619**, (2008). 74–81
- [4] Бойко В.М. Физические основы технологии ядерного легирования In-содержащих полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ // Автореф. дис... канд. ф.-мат. наук: 01.04.10./ Гос. Унит. Предпр. НИФХИ. – М., 2007.
- [5] Колин Н.Г. Ядерное легирование и радиационное модифицирование полупроводников: состояние и перспективы. // *Изв. ВУЗов. Физика.* **45** (6), (2003). 12–20.
- [6] Колин Н.Г., Меркурисов Д.И., Соловьев С.П. Электрофизические свойства ядерно-легированного антимонида индия // *Физика и техника полупроводников.* **33**(7), (1999). 774–777.
- [7] Колин Н.Г., Освенский В.Б., Рытова Н.С., Юрова Е.С. Свойства ядерно-легированного арсенида индия // *Физика и техника полупроводников.* **20** (5), (1986). 822–827.
- [8] Колин Н.Г., Меркурисов Д.И., Соловьев С.П. Электрофизические свойства InSb, облученного быстрыми нейтронами реактора // *Физика и техника полупроводников.* **33**(8), (1999). 927–929.
- [9] Брудный В.Н., Колин Н.Г., Смирнов Л.С. Модель самокомпенсации и стабилизации уровня Ферми в облученных полупроводниках // *Физика и техника полупроводников.* **41**(9). (2007). 1031–1040.
- [10] Колин Н.Г., Освенский В.Б., Рытова Н.С., Юрова Е.С. Электрофизические свойства арсенида индия, облученного быстрыми нейтронами. (Воздействие потоков энергии на материалы) // *Физика и химия обработки материалов*, **6**. (1986). 3–8.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СЕНСОРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.А. Большакова^a, Л. Вьерербл^b, И. Дюран^c, В.Е. Ерашок^a, Н.В. Ковалева^a,
О.Ю. Макидо^a, А.П. Мороз^a, Ф.М. Шурыгин^a

^a *Національний університет "Львівська політехніка",*

ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина

^b *Исследовательский центр Реж*

Реж, Чешская республика

^c *Институт физики плазмы АН ЧР*

За Словакку 3, 182 00 Прага 8, Чешская республика

Проведены исследования влияния нейтронного облучения на параметры тонкопленочных сенсоров магнитного поля на основе InAs и InSb. Определено влияние спектра нейтронов на величину изменения параметров сенсоров. Представлены результаты отжига радиационных дефектов облученных образцов. Показано, что изменение параметров сенсоров на основе многослойных структур определяется не только поведением материала рабочего слоя, но и влиянием нейтронного облучения на свойства буферных слоев данной структуры.

Ключевые слова: полупроводниковые сенсоры, арсенид индия, антимонид индия, многослойные гетероструктуры, нейтронное облучение.

УДК: 621.315.592

INVESTIGATION OF NEUTRON IRRADIATION EFFECT ON THIN-FILM MAGNETIC FIELD SENSORS

I. Bolshakova^{a, *}, L. Viererbl^b, I. Ďuran^c, V. Yerashok^a, N. Kovaliova^a,
O. Makido^a, A. Moroz^a, F. Shurygin^a

^a*Lviv Polytechnic National University
(12, S. Bandera st., L'viv, 79013, Ukraine)*

^b*Research Centre Řež
(Řež, Czech Republic)*

^c*Institute of Plasma Physics AS CR
(Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8, Czech Republic)*

The investigation of neutron irradiation effect on the parameters of thin-film magnetic field sensors based on InAs and InSb was conducted. The effect of neutron spectrum on sensor parameters' change value was determined. The results of radiation defects' annealing of the irradiated samples are presented. It is shown that parameter change of the sensors based on multilayer structures are defined by not only the working layer behavior, but also by the impact of neutron irradiation on the buffer layer properties of this structure.

Key words: semiconductor sensors, indium arsenide, indium antimonide, multilayer heterostructures, neutron irradiation

УДК: 621.315.592

*Corresponding author