

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.315.592

І.А. Большакова, В.Е. Єрашок, О.Ю. Макідо, А.В. Марусенков, Ф.М. Шуригін
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ НЕЙТРОНАМИ ТА ЕЛЕКТРОНАМИ НА ПЛІВКОВІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

© Большакова І.А., Єрашок В.Е., Макідо О.Ю., Марусенков А.В., Шуригін Ф.М., 2010

I.A. Bolshakova, V.E. Yerashok, O.Yu. Makido, A.V. Marusenko, F.M. Shurygin

HIGH-ENERGY NEUTRONS AND ELECTRONS IRRADIATION EFFECT ON MAGNETIC FIELD FILM SENSORS

© Bolshakova I.A., Yerashok V.E., Makido O.Yu., Marusenko A.V., Shurygin F.M., 2010

Досліджено залежність стабільності параметрів плівкових сенсорів магнітного поля на основі InAs та InSb від температури опромінення. Наведені результати досліджень впливу спектра нейтронів на величину зміни чутливості сенсорів. Показані особливості поведінки параметрів сенсорів на основі багатосарових гетероструктур, опромінених електронами та реакторними нейтронами.

Ключові слова: арсенід індію, антимонід індію, багатосарові гетероструктури, нейтронне опромінення, електронне опромінення.

The dependence of parameter stability for InAs- and InSb-based film sensors of magnetic field from irradiation temperature has been investigated. Results of the research into the effect of neutron spectrum on the value of sensitivity change for sensors are presented. Features of parameter behaviour for sensors on the basis of multilayer heterostructures irradiated with electrons and reactor neutrons are shown.

Keywords: indium arsenide, indium antimonide, multilayer heterostructure, neutron irradiation, electron irradiation.

Вступ

Для підвищення точності вимірювання steady-state магнітних полів реакторів термоядерного синтезу передбачається використання напівпровідникових холлівських сенсорів для магнітної діагностики [1]. Нестабільність напівпровідникових матеріалів у радіаційних умовах опромінення нейтронами обмежує використання напівпровідникових сенсорів для вимірювання магнітних полів у реакторах термоядерного синтезу.

Попередні дослідження, проведені в Лабораторії магнітних сенсорів на мікрмонокристалах InSb та InAs, показали можливість застосування цих напівпровідникових матеріалів для виготовлення на їх основі сенсорів магнітного поля для експлуатації в умовах радіації та

підвищеної температури [2, 3]. Однак багато практичних задач з магнітної діагностики вимагають використання серійних сенсорів, якими можуть бути лише тонкоплівкові сенсори, виготовлені за груповою технологією. У цій роботі аналізуються результати дослідження тонкоплівкових сенсорів на основі InSb та InAs, опромінених реакторними нейтронами та прискореними електронами. При цьому тонкі плівки InSb були отримані методом магнетронного розчинення з наступною кристалізацією, товщина плівки становила 1,9 мкм. Вони являють собою просту гетероструктуру InSb/i-GaAs з використанням як підкладки напівізолюючого арсеніду галію.

Тонкі плівки InAs, отримані методом молекулярно променевої епітаксії, товщина плівки становили 0,25 мкм. Підкладкою використовували напівізолюючий арсенід галію, але між підкладкою та тонкою плівкою InAs були розміщені декілька буферних шарів для узгодження параметрів ґратки плівки з підкладкою.

Результати проведених досліджень

Вплив опромінення на параметри плівкових сенсорів магнітного поля визначали за величиною зміни їх чутливості. Дослідження зміни чутливості опромінених плівкових сенсорів InSb та InAs проводилось за різних співвідношень потоків швидких та теплових нейтронів та за різних температур опромінення нейтронами та прискореними електронами. Дослідження проводили в реакторах ВВР-М (м. Гатчина, Росія) і LVR-15 (м. Реж, Чехія) та на прискорювачі електронів ELIAS (м. Харків, Україна). Вихідна концентрація носіїв заряду в тонкоплівкових структурах InAs становила $n_0=1,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, вихідна концентрація носіїв заряду для InSb становила $n_0=2,0 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Дослідження при різних температурах опромінення плівкових сенсорів на основі InSb та InAs, проводили при опроміненні зразків реакторними нейтронами до флюенсу $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

Як показали одержані результати для сенсорів на основі InAs (див. табл. 1) підвищення температури нейтронного опромінення до 100 °С практично не впливає на величину зміни чутливості. За вищих температур опромінення ($T_{\text{опр}} = 160 \text{ °С}$) спостерігається істотне зменшення величини зміни чутливості сенсора.

Таблиця 1

Зміна чутливості плівкових сенсорів InAs<Si> у разі нейтронного опромінення до $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

№ з/п	Температура опромінення T, °С	Відносна зміна чутливості сенсора, $\Delta S/S$, %	Реактор
1	17	-77	ІБР-2
2	60	-77	ВВР-м
3	100	-75	LVR-15
4	160	-24	ВВР-м

Такі результати можна пояснити частковим відпадом точкових радіаційних дефектів в InAs, що відбувається за температур вище 100 °С [4]. Отже, під час опромінення одночасно відбувається як утворення радіаційних дефектів, так і їх часткова анігіляція. Це зменшує кінцеву кількість введених радіаційних дефектів у матеріалі, що виражається значно меншою зміною чутливості опроміненого сенсора.

Для матеріалу InSb за температур опромінення вище 100 °С так само існує частковий відпал точкових радіаційних дефектів [4], що і було виявлено в результаті виконаних досліджень тонкоплівкових сенсорів InSb (зразки 2–4, табл. 2).

Мале значення зміни чутливості зразка 1 (табл. 2) випадає з цієї залежності, що свідчить про наявність іншого фактора, який впливає на зміну чутливості сенсорів під дією нейтронного опромінення і пов'язаний з умовами опромінення. Значення зміни чутливості сенсорів на основі InAs та InSb залежить як від температури опромінення, так і від спектра нейтронів у реакторах. При цьому вплив спектра реакторних нейтронів для InSb є істотніший, ніж для InAs.

Таблиця 2

**Зміна чутливості плівкових сенсорів InSb<Sn>
під час нейтронного опромінення до $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$**

№ з/п	Температура опромінення $T, ^\circ\text{C}$	Відносна зміна чутливості сенсора, $\Delta S/S, \%$	Реактор
1	17	-15	ІБР-2
2	60	-61	ВВР-м
3	100	-60	LVR-15
4	160	-27	ВВР-м

Дослідження при різних спектрах реакторних нейтронів для плівкових сенсорів InSb та InAs проводили в каналах реакторів ІБР-2, ВВР-м та LVR-15. Кожен з цих реакторів характеризується різним співвідношенням потоків швидких ($\varphi_{\text{ш}}$) та теплових ($\varphi_{\text{т}}$) нейтронів. Співвідношення теплових та швидких нейтронів ($\varphi_{\text{т}}/\varphi_{\text{ш}}$) для них становить, відповідно, 0,25, 10,1 та 18,4. Для одержання дозової залежності зміни чутливості сенсорів за різного спектра реакторних нейтронів дослідження проводили методом on-line вимірювань. Результати виконаних досліджень наведені на рис. 1 та 2.

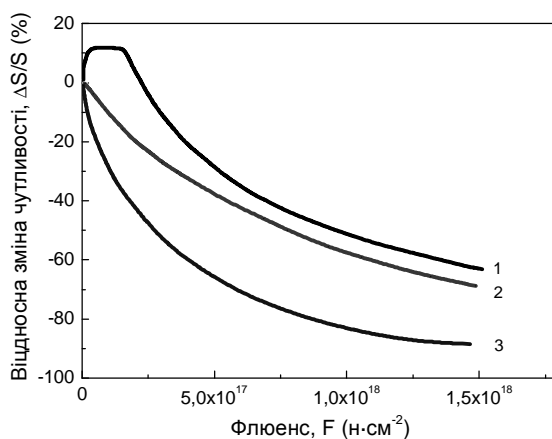


Рис. 1. Дозова залежність відносної зміни чутливості тонкоплівкових сенсорів на основі InSb залежно від співвідношення потоків теплових ($\varphi_{\text{т}}$) та швидких ($\varphi_{\text{ш}}$) нейтронів:
1 – реактор ІБР-2 ($\varphi_{\text{т}}/\varphi_{\text{ш}} = 0,25$); 2 – реактор ВВР-м ($\varphi_{\text{т}}/\varphi_{\text{ш}} = 10,1$); 3 – реактор LVR-15 ($\varphi_{\text{т}}/\varphi_{\text{ш}} = 18,4$)

Як видно з рис. 1, для сенсорів InSb явно проявляється залежність чутливості сенсорів від спектра реакторних нейтронів, тобто від співвідношення $\varphi_{\text{т}}/\varphi_{\text{ш}}$. Це пов'язане з фізичними процесами, що відбуваються в матеріалі в результаті взаємодії його з нейтронами [5].

Як відомо, під час опромінення повним потоком реакторних нейтронів в InSb одночасно відбуваються два процеси. У разі взаємодії атомів In з тепловими нейтронами відбувається легування матеріалу донорною домішкою оловом за рахунок трансмутаційних перетворень $^{113}\text{In}(n, g), ^{114}\text{In} \xrightarrow{\beta} ^{114}\text{Sn}$, що приводить до зростання концентрації вільних носіїв заряду в матеріалі та зменшення чутливості сенсора. У разі взаємодії атомів ґратки із швидкими нейтронами відбувається утворення радіаційних дефектів переважно акцепторного типу, що приводить до зменшення концентрації вільних носіїв заряду та зростання чутливості сенсора [5, 6]. Тобто, саме співвідношення потоків теплових та швидких нейтронів визначатиме величину та характер зміни чутливості під час опромінення.

Наведений вище механізм взаємодії InSb з реакторними нейтронами добре спостерігається на кривій 1 рис. 1. Під час цього експерименту в каналі реактора ІБР-2 співвідношення між тепловими та

швидкими нейтронами є найменшим, тобто, в потоці переважають швидкі нейтрони. У результаті на початковій стадії опромінення до флюенсу $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в матеріалі переважає механізм утворення радіаційних дефектів акцепторного типу, що приводить до зростання чутливості сенсора. У діапазоні флюенсів від $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ швидкості утворення акцепторних рівнів за рахунок радіаційних дефектів та донорних рівнів за рахунок трансмутаційних реакцій практично стають однаковими. Це зумовлює стабілізацію чутливості сенсора в цьому діапазоні флюенсів (ділянка паралельна осі X на кривій 1 рис. 1). Під час подальшого зростання дози опромінення швидкість введення донорних рівнів переважає, що і виражається у зменшенні чутливості сенсора.

За іншого співвідношення потоків теплових та швидких нейтронів $\varphi_{\text{тп}}/\varphi_{\text{ш}}$, коли кількість теплових нейтронів у потоці є на порядок більша (реактори ВВР-м та LVR-15), швидкість утворення донорних рівнів в матеріалі переважає в усьому діапазоні флюенсів, що і приводить до постійного зменшення чутливості сенсорів (криві 2, 3 на рис. 1).

Для сенсорів на основі InAs залежність величини зміни чутливості сенсорів від спектра реакторних нейтронів, тобто, від співвідношення $\varphi_{\text{тп}}/\varphi_{\text{ш}}$, проявляється слабо (рис. 2). Це пов'язано із особливостями механізмів дефектоутворення в InAs під час його опромінення.

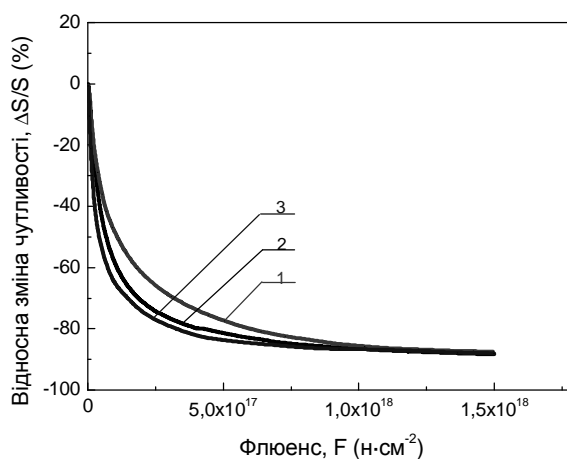


Рис.2. Дозова залежність відносної зміни чутливості тонкоплівкових сенсорів на основі InAs залежно від співвідношення потоків теплових ($\varphi_{\text{тп}}$) та швидких ($\varphi_{\text{ш}}$) нейтронів:

1 – реактор ІБР-2 ($\varphi_{\text{тп}}/\varphi_{\text{ш}} = 0,25$); 2 – реактор ВВР-м ($\varphi_{\text{тп}}/\varphi_{\text{ш}} = 10,1$); 3 – реактор LVR-15 ($\varphi_{\text{тп}}/\varphi_{\text{ш}} = 18,4$)

Так само як і для InSb, для InAs під час 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 [5, 7]. Тобто, для цього матеріалу, на відміну від InSb, взаємодія як з тепловими, так і із швидкими нейтронами, приводить до зростання концентрації вільних носіїв заряду та зменшення чутливості сенсора. Крутизна залежності зміни чутливості сенсора від флюенса нейтронів вказує на те, що більший внесок у загальну зміну чутливості роблять процеси ядерного легування.

Дослідження плівкових сенсорів InAs під дією опромінення прискореними електронами проводили у прискорювачі електронів KS/3000 Van de Graaff ELIAS, що розташований в Науково-дослідному центрі „Циклотрон” Національного наукового центру Харківського фізико-технічного інституту (Україна). Опромінення проводили електронами з енергією $E = 2,5 \text{ MeV}$ до флюенсів $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\Phi = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ та $\Phi = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ за інтенсивності потоку до $\varphi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ за температури $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

У всіх опромінених зразках InAs з відповідною концентрацією вільних носіїв заряду $n \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігалось зростання концентрації носіїв заряду, що може свідчити про утворення радіаційних дефектів переважно донорного типу. Такий механізм дефектоутворення

характерний як для монокристалічних зразків, так і для плівкових (рис.3). При цьому значне збільшення концентрації спостерігається також при дуже високих флюенсах електронів $> 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (зразок 2 в табл. 3). Аналогічне значне зростання концентрації спостерігалось під час опромінення сенсорів високими флюенсами нейтронів $> 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (зразок 1 в табл. 3).

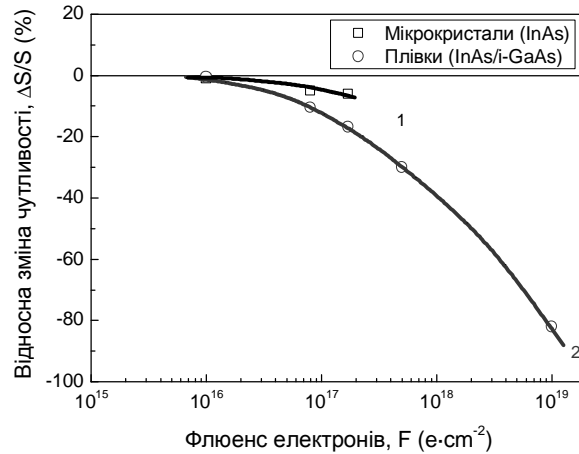


Рис. 3. Дозова залежність відносної зміни чутливості мікрокристалічних та тонкоплівкових сенсорів InAs після опромінення високоенергетичними електронами

Таблиця 3

Розрахункова концентрація вільних носіїв заряду опромінених плівкових сенсорів InAs

№ з/п	Початкова концентрація н.з., n_0	Кінцева концентрація н.з., n_k	Флюенс
1	$1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{18} \text{ е} \cdot \text{см}^{-2}$
2	$1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{19} \text{ е} \cdot \text{см}^{-2}$

До того ж відомо [5, 7], що в сильно легованому InAs ($n \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$) за умов „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 $E_v + (0,51-0,55) \text{ eV}$ [5, 7], 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 цього напівпровідникового матеріалу, для якого співвідношення кількості утворених радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів залежить від концентрації 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, за якої настає закріплення рівня Фермі і стабілізація чутливості сенсорів. Значення отриманої в табл. 3 концентрації вільних носіїв значно перевищують граничну концентрацію для цього матеріалу.

Розбіжність між даними робіт Коліна і Брудного та отриманими результатами, очевидно, пов’язана з особливостями поведінки складної структури тонкоплівкових шарів InAs (рис. 4), в якій між робочим шаром плівки InAs та підкладкою GaAs були розташовані буферні шари i-InAs, i-In_xAl_{1-x}As, i-In_xGa_{1-x}As.

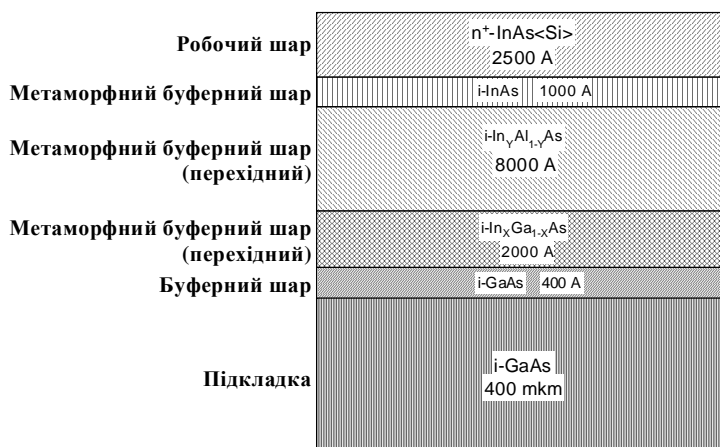


Рис. 4. Структура тонкоплівкового сенсора InAs

Провідність у цих проміжних шарах збільшується з нагромадженням 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 із зміною концентрації носіїв заряду і наведені в табл. 3 значення кінцевої концентрації не відповідають її реальному значенню.

Висновки

У результаті виконаних досліджень було встановлено, що зростання температури опромінення вище 100 °С приводить до покращання стабільності параметрів плівкових сенсорів магнітного поля на основі InAs та InSb.

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

Визначено, що для складних багатшарових гетероструктур під дією нейтронного та електронного опромінення відбувається зміна параметрів не лише активного шару, а й проміжних метабуферних шарів. Використання напівпровідникових багатшарових гетероструктур при радіаційному навантаженні значно ускладнює прогнозування зміни їх параметрів під дією опромінення.

1. Vayakis G., Walker C. *Magnetic Diagnostics for ITER/BPX plasmas*, *Rev. Sci. Instrum.*, 74(4), 2003.
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*. – 2005. – 39(7).
3. Большакова И.А., Гумен І.С., Ковальова Н.В., Макідо О.Ю., и др. Дослідження впливу температури опромінення на зміну параметрів напівпровідникових сенсорів магнітного поля на основі InSb та InAs // *Вісн. Нац. ун-ту „Львівська політехніка”*. – 2008. – № 619: *Електроніка*.
4. Бойко В.М. *Физические основы технологии ядерного легирования In-содержащих полупроводниковых соединений A^{III}B^V*: Автореф. Дис. ... к-та фіз.-мат. наук: 01.04.10. / Гос. Унит. Предпр. НИФХИ. – М., 2007.
5. Брудный В.Н., Колин Н.Г., Смирнов Л.С. Модель самокомпенсации и стабилизации уровня Ферми в облученных полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*. – 2007. – 41(9).
6. Колин Н.Г., Меркурисов Д.И., Соловьев С.П. Электрофизические свойства ядерно-легированного антимонида индия // *Физика и техника полупроводников*. – 1999. – 33(7).
7. 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*. – 1986. – 6.