

ФІЗИКА І ТЕХНІКА НАПІВПРОВІДНИКІВ, МЕТАЛІВ, ДІЕЛЕКТРИКІВ ТА РІДКИХ КРИСТАЛІВ

УДК 621.315.592

І.А. Большакова, Я.Я. Кость, О.Ю. Макідо, Ф.М. Шуригін
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

ВЛАСТИВОСТІ МІКРОКРИСТАЛІВ INASSB, ВИРОЩЕНИХ З ГАЗОВОЇ ФАЗИ, ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ЇХ ПАРАМЕТРИ

Ó Большакова І.А., Кость Я.Я., Макідо О.Ю., Шуригін Ф.М., 2009

I.A. Bolshakova, Ya.Ya. Kost, O.Yu. Makido, F.M.Shurygin

PROPERTIES OF INASSB MICROCRYSTALS GROWN FROM VAPOR PHASE AND INVESTIGATION OF NEUTRON IRRADIATION INFLUENCE ON THEIR PARAMETERS

Ó Bolshakova I.A., Kost Ya.Ya., Makido O.Yu., Shurygin F.M., 2009

Представлено результати вирощування методом газотранспортних реакцій мікрокристалів твердих розчинів $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ з різним складом InSb: від 2 до 16 моль %. Визначено, що високою рухливістю носіїв заряду до $30000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}$ характеризуються мікрокристали твердих розчинів складу $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$. Легування оловом мікрокристалів $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ дає змогу зменшити температурні коефіцієнти сталої Холла та питомого опору порівняно із InSb за збереження високої чутливості до магнітного поля. Одночасно радіаційна стійкість таких кристалів вища за радіаційну стійкість кристалів InAs. Проведені дослідження показали, що кристали твердого розчину InAsSb є перспективними для використання їх як сенсорів магнітного поля в екстремальних умовах.

Results of vapor-transport reaction method application for growing $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ solid solution microcrystals with different InSb inclusion: from 2 mole% to 16 mole% are presented in the paper. It has been determined that high charge carrier mobility up to $30000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}$ is characteristic to solid solution microcrystals of $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ composition. Doping of $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ microcrystals with stannum allows to decrease temperature coefficients of Hall constant and resistivity as compared to InSb maintaining high magnetic field sensitivity. At the same time, radiation hardness of such crystals is higher than radiation stability of InAs crystals. The conducted research has shown that crystals of InAsSb solid solution are perspective for being used as magnetic field sensors in extreme environment.

Вступ

Відомо, що для проведення діагностики магнітного поля ефективними є гальваноманітні перетворювачі, а саме – напівпровідникові холлівські сенсори, які можуть з необхідною точністю вимірювати як імпульсні, так і квазістаціонарні магнітні поля.

Основними проблемами, які перешкоджають використанню напівпровідникових сенсорів в екстремальних умовах експлуатації (високі температури та радіація), є нестабільність характеристик існуючих промислових сенсорів у цих умовах.

У попередніх дослідженнях, проведених у Лабораторії Магнітних Сенсорів, були створені радіаційностійкі напівпровідникові мікрокристали InSb, InAs та сенсори на їх основі, параметри яких є стабільними під час опромінення швидкими нейтронами.

Однак використання матеріалів InSb та InAs як чутливих елементів сенсорів має певні обмеження. Для InSb воно пов'язане із обмеженим діапазоном робочих температур (до 100 °C), для InAs – з меншою чутливістю до магнітного поля. Використання як чутливих елементів сенсорів твердих розчинів напівпровідникових сполук InAs-InSb, які поєднують у собі властивості компонентів залежно від їх співвідношення, дасть змогу за достатньої рухливості носіїв заряду та чутливості сенсорів підвищити температурну стабільність параметрів сенсорів на їх основі.

Структура та електрофізичні властивості мікрокристалів InAs_{1-x}Sb_x

Відомо, що технологія вирощування напівпровідникових матеріалів методом хімічних транспортних реакцій дає можливість отримати структурно досконалі напівпровідникові кристали із заданим складом та властивостями.

За розробленою технологією вирощування мікрокристалів твердого розчину InAsSb з газової фази за механізмом пара-рідина-кристал були отримані структурно досконалі кристали з різним вмістом мольних процентів InSb у твердому розчині – від 2 до 16 моль %. Результати проведених рентгеноструктурних досліджень, наведені в табл. 1, показали, що для усіх вирощених ниткоподібних кристалів InAs_{1-x}Sb_x залежно від вмісту InSb у твердому розчині, зміна параметра кристалічної ґратки відбувається за законом Вегарда:

$$a = x \cdot a_1 + (1 - x) \cdot a_2, \quad (1)$$

де x – мольна частка розчинника; a_1 і a_2 – значення параметра ґратки розчинника і речовини, що розчиняється [1].

Таблиця 1

Параметр ґратки та співвідношення елементів п'ятої групи в мікрокристалах твердих розчинів InAs_{1-x}Sb_x

№ з/п	Матеріал	Параметр ґратки a , Å	Вміст компонентів, моль %		Співвідношення елементів п'ятої групи у твердому розчині	
			InAs	InSb	$1-x$	x
					As	Sb
1	InAs	6.0584	100	0	1	-
2	InAs _{0.98} Sb _{0.02}	6.0690	98	2	0.98	0.02
3	InAs _{0.96} Sb _{0.04}	6.0749	96	4	0.96	0.04
4	InAs _{0.94} Sb _{0.06}	6.0855	94	6	0.94	0.06
5	InAs _{0.92} Sb _{0.08}	6.0915	92	8	0.92	0.08
6	InAs _{0.90} Sb _{0.10}	6.1013	90	10	0.90	0.10
7	InAs _{0.88} Sb _{0.12}	6.1089	88	12	0.88	0.12
8	InAs _{0.86} Sb _{0.14}	6.1173	86	14	0.86	0.14
9	InAs _{0.84} Sb _{0.16}	6.1258	84	16	0.84	0.16
10	InSb	6.4794	0	100	-	1

Ця залежність носить лінійний характер (рис. 1) і добре узгоджується із літературними даними [2].

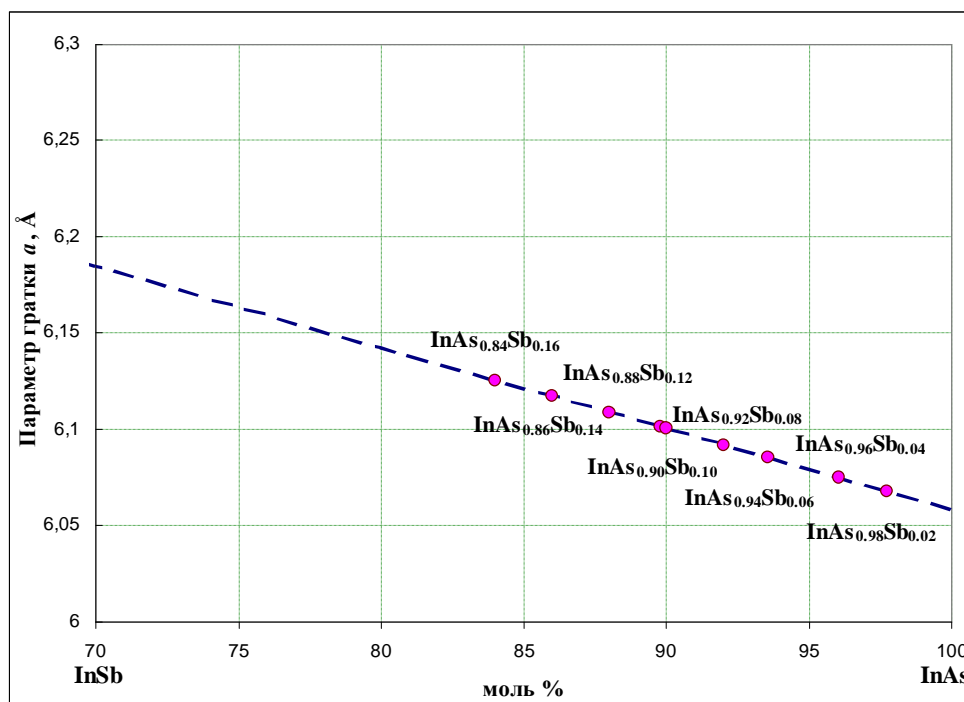


Рис. 1. Залежність параметра ґратки мікрокристалів твердого розчину $InAs_{1-x}Sb_x$ від співвідношення компонентів $InAs$ та $InSb$ (пунктирна пряма – розрахункова залежність, точки – експериментальні дані): масштаб в межах (70–100) моль% $InAs$

Дослідженнями електрофізичних властивостей, вирощених з газової фази мікрокристалів твердих розчинів, було встановлено, що для складу $InAs_{0.84}Sb_{0.16}$ рухливість носіїв заряду становить $30000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}$ за концентрації вільних носіїв заряду $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, що перевищує рухливість носіїв заряду $InAs$ для таких концентрацій.

Раніше проведені роботи показали [3, 4], що для забезпечення радіаційної стійкості матеріалів $InAs$ та $InSb$ необхідно створити певний рівень концентрації вільних носіїв заряду матеріалу, причому для кожного із цих матеріалів значення оптимальної концентрації буде різним.

Тому для подальших досліджень температурної стабільності та радіаційної стійкості мікрокристали твердого розчину складу $InAs_{0.84}Sb_{0.16}$ легувались оловом під час вирощування в широкому діапазоні концентрацій.

Вибір легуючої домішки пов'язаний зі специфікою In -вмісних матеріалів, в яких внаслідок трансмутаційних реакцій на теплових нейтронах відбувається перетворення атомів індію в олово [5].

Вимірювання досліджуваних зразків мікрокристалів $InAs_{0.84}Sb_{0.16}$ з різною вихідною концентрацією носіїв заряду від $3 \cdot 10^{16}$ до $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ проводили на вимірювальній установці Н-5 в інтервалі температури від 77 до 500 К. Значення основних кінетичних коефіцієнтів досліджуваних кристалів за кімнатної температури – стала Холла R_H , питомий опір ρ та рухливість носіїв заряду μ , наведені у табл. 2.

За температурними залежностями кінетичних коефіцієнтів були визначені температурні коефіцієнти сталої Холла b_x та питомого опору a_r для цих мікрокристалів твердого розчину. В інтервалі температур (77÷300) К для зразків з концентрацією носіїв заряду $n = (3\div 5) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ температурний коефіцієнт сталої Холла b_x приймає значення $(0,3\div 0,2) \% \cdot \text{град}^{-1}$; температурний коефіцієнт питомого опору a_r становить $(0,14\div 0,13) \% \cdot \text{град}^{-1}$. Сильнолеговані зразки з концентрацією носіїв заряду $(3\div 5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ характеризуються температурними коефіцієнтами, значення яких на декілька порядків менше: $b_x = (0,002\div 0,02) \% \cdot \text{град}^{-1}$, $a_r = (0,05\div 0,08) \% \cdot \text{град}^{-1}$. В інтервалі

температур (300÷500) К для слаболегованих зразків з концентрацією вільних носіїв заряду $(0,3\div 1)\cdot 10^{17}$ см⁻³ температурний коефіцієнт сталої Холла b_x приймає значення $-(2\div 3)\%$ ·град⁻¹, а температурний коефіцієнт питомого опору $a_r = -(0,3\div 0,2)\%$ ·град⁻¹; тоді як для сильнолегованих зразків вони становлять: $b_x = -(0,5\div 0,1)\%$ ·град⁻¹, $a_r = 0,1\%$ ·град⁻¹.

Таблиця 2

Електрофізичні параметри кристалів InAs_{0,84}Sb_{0,16} за T = 300 К

№ зразка	Концентрація н.з. n, см ⁻³	Стала Холла, см ³ ·Кл ⁻¹	Питомий опір $\rho\cdot 10^4$, Ом·см	Рухливість н.з. μ , см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
1	$3\cdot 10^{16}$	323	115,20	30000
2	$5\cdot 10^{16}$	248	85,90	24000
3	$1\cdot 10^{17}$	6,25	5,23	11900
4	$2\cdot 10^{18}$	1,41	2,18	6600
5	$5\cdot 10^{18}$	0,8	1,35	6100
6	$1\cdot 10^{19}$	0,33	0,81	4200

Отже, сенсори магнітного поля, створені на мікрокристалах InAsSb, легованих оловом до концентрацій вільних носіїв заряду $(1\div 5)\cdot 10^{18}$ см⁻³, матимуть стабільніші характеристики в широкому інтервалі робочих температур (77÷500) К.

При цьому визначення чутливості сенсорів магнітного поля, створених на основі мікрокристалів InAs_{0,84}Sb_{0,16}, показали, що вищими значеннями чутливості характеризуються зразки з рівнем концентрації вільних носіїв заряду $n = (3\div 5)\cdot 10^{16}$ см⁻³. Величина чутливості для цих зразків становить (130÷150) мВ/Тл. Чутливість легованих зразків із концентрацією носіїв заряду $(1\div 5)\cdot 10^{18}$ см⁻³ є на два порядки менша і приймає значення від 1,4 до 3,2 мВ/Тл.

Низьке значення чутливості < 10 мВ/Тл для сильнолегованих зразків InAs_{0,84}Sb_{0,16} обмежує область їх застосування як чутливих елементів сенсорів магнітного поля для вимірювальних задач, незважаючи на високу температурну стабільність їх вихідного сигналу.

Хоча значення температурних коефіцієнтів слаболегованих мікрокристалів InAs_{0,84}Sb_{0,16} вищі за значення температурних коефіцієнтів сильнолегованих мікрокристалів InAs_{0,84}Sb_{0,16}, однак за температурною стабільністю вони перевищують мікрокристали InSb ($b_x = 0,8\%$ ·град⁻¹, $a_r = 0,3\%$ ·град⁻¹). Враховуючи високу чутливість таких зразків до магнітного поля, яка наближається до чутливості мікрокристалів InSb (160 мВ/Тл за робочого струму 20 мА), можна вважати параметри цих зразків оптимальними для створення на їх основі високопрецизійних холлівських сенсорів з кращою температурною стабільністю порівняно з сенсорами на основі InSb.

Вплив опромінення реакторними нейтронами

Дослідження впливу дії нейтронного опромінення на параметри легованих мікрокристалів твердого розчину складу InAs_{0,84}Sb_{0,16} проводились в реакторі ИБР-2 Лабораторії Нейтронної Фізики Об'єднаного Інституту Ядерних Досліджень в Дубні. Для опромінення були відібрані зразки InAs_{0,84}Sb_{0,16}, InSb та InAs, леговані оловом у процесі вирощування до концентрацій носіїв заряду в межах $n = 3\cdot 10^{16}\div 1\cdot 10^{19}$ см⁻³. Дослідження проводилось під час опромінення повним спектром реакторних нейтронів до флюенсу $\Phi=1\cdot 10^{16}$ н/см² за інтенсивності потоку $(0,8\div 1)\cdot 10^{10}$ н·см⁻²·с⁻¹. Оскільки в умовах опромінення основний внесок у зміну чутливості сенсора робить зміна концентрації носіїв заряду в матеріалі чутливого елемента, тому радіаційну стійкість дослідного матеріалу визначали за відносною зміною концентрації носіїв заряду. Вимірювання зразків проводили до та після опромінення з чітким дотриманням усіх умов вимірювань на

високопрецизійному стенді ТІ-3 на базі установки HMS 7504 (США), відносна похибка визначення зміни концентрації носіїв заряду матеріалу ($\Delta n/n$) становила не більше 0,01 %.

За отриманими результатами побудовано графік залежності відносної зміни концентрації носіїв заряду від початкової концентрації носіїв заряду зразків (рис. 2).

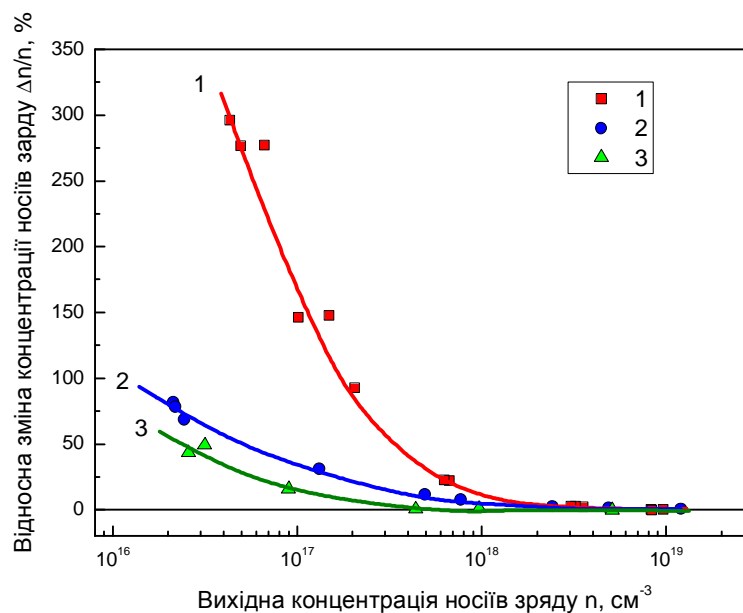


Рис. 2. Концентраційна залежність відносної зміни концентрації носіїв заряду в результаті опромінення реакторними нейтронами до $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ н/см²:
1 – мікрочистали InAs; 2 – мікрочистали InAs_{0,84}Sb_{0,16}; 3 – мікрочистали InSb

Як показали результати досліджень, для усіх зразків дослідних матеріалів (InAs, InAs_{0,84}Sb_{0,16} та InSb) з вихідною концентрацією носіїв заряду $n_0 < 10^{18}$ см⁻³ спостерігається зростання концентрації вільних носіїв заряду під час опромінення.

Раніше проведені дослідження впливу нейтронного опромінення на параметри InAs та InSb було визначено, що під час опромінення цих напівпровідникових матеріалів повним спектром реакторних нейтронів зміна параметрів відбувається за рахунок двох механізмів, що одночасно перебігають у матеріалі: за рахунок ядерного легування, що відбувається під дією теплових та резонансних нейтронів; за рахунок утворення радіаційних дефектів під дією швидких нейтронів реактора [3, 4].

Для індій-вмісних напівпровідникових сполук спостерігається висока ефективність ядерного легування, яка пов'язана з великим значенням перерізу поглинання теплових нейтронів атомами індію [5]. При цьому легування матеріалу за рахунок трансмутаційних перетворень In→Sn не залежить від вихідного рівня легування матеріалу, а залежить від флюенсу теплових нейтронів та коефіцієнта легування, який є константою для кожного матеріалу.

Одночасно із зростанням концентрації носіїв заряду за рахунок ядерного легування в InSb за взаємодії із швидкими нейтронами спостерігається утворення радіаційних дефектів переважно акцепторного типу [3, 4, 6], що приводить до компенсації провідності. У той самий час опромінення швидкими нейтронами InAs приводить до утворення у ньому радіаційних дефектів, переважно донорного типу [4, 7], що поряд з ядерним легуванням матеріалу приводить до різкого зростання концентрації носіїв заряду.

Дослідження впливу дії нейтронного опромінення на параметри мікрочисталів твердого розчину InAsSb показали, що введення в InAs атомів сурми приводить до зростання радіаційної стійкості матеріалу, що може бути пов'язано зі зміною співвідношення кількості радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів, що утворюються у твердому розчині під час опромінення.

Оскільки кількість введеної домішки олова в результаті ядерних реакцій для цих матеріалів залежить тільки від флюенсу теплових нейтронів, то вплив ядерного легування зі збільшенням вихідної концентрації носіїв заряду ($n > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) стає менш помітним, однак мала чутливість таких кристалів до магнітного поля обмежує їх використання як чутливих елементів холлівських сенсорів.

Висновки

Розроблена технологія вирощування мікрокристалів твердого розчину InAsSb з газової фази за механізмом пара-рідина-кристал дає змогу отримувати досконалі кристали із різним вмістом мольних процентів InSb у твердому розчині – від 2 до 16 моль%. Легування оловом мікрокристалів $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$, які характеризуються високою рухливістю носіїв заряду, дає змогу зменшити температурні коефіцієнти сталої Холла та питомого опору порівняно із InSb за збереження високої чутливості до магнітного поля.

Дослідження впливу нейтронного опромінення на параметри кристалів InSb , InAs та $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ показали, що введення в матеріал InAs невеликої кількості атомів сурми приводить до зростання радіаційної стійкості матеріалу. Враховуючи підвищену температурну стабільність параметрів кристалів твердого розчину $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ та чутливість до магнітного поля (близько 160 мВ/Тл за робочого струму 20 мА), можна зробити висновок про перспективність використання цих кристалів як чутливих елементів холлівських сенсорів за високих температури та опромінення реакторними нейтронами.

1. Вигдорович В.Н., Пинчук В.Н., Фурманов Г.П. Твердые растворы $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, их свойства, технология получения и применение в электронной технике // Обз. по электр. техн. Сер. Материалы. – 1981. – Вып. 4(809). – С. 1–52. 2. Твердые растворы в полупроводниковых системах: Справочник АН СССР / Институт металлургии им. А.А. Байкова. – М.: Наука, 1978. – 454 с. 3. Большакова И.А., Бойко В.М., Брудный В.Н., Каменская И.В., Колин Н.Г., Макидо Е.Ю., Московец Т.А., Меркурисов Д.И. Влияние нейтронного облучения на свойства нитевидных микрокристаллов $n\text{-InSb}$ // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 7. – С. 814–819. 4. Большакова И.А., Брудный В.Н., Заячук Д.М., Макидо О.Ю., Маслюк В.Т., Мегела И.Г., Московец Т.А., Шуригин Ф.М. Влияние электронного опромінення на мікрокристали $\text{InSb} < \text{Sn} >$ та $\text{InAs} < \text{Sn} >$ // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 2. – С. 198–202. 5. Колин Н.Г. Ядерное легирование и радиационное модифицирование полупроводников: состояние и перспективы // Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 6. – С. 12–20. 6. Колин Н.Г., Меркурисов Д.И., Соловьев С.П. Электрические свойства InSb , облученного быстрыми нейтронами реактора // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 8. – С. 927–929. 7. Брайловский Е.Ю., Гоер Д.Б., Гутич. Ю.И., Мегела И.Г. Радиационное дефектообразование в кристаллах InAs при электронном облучении: Препр. // АН Украины, Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-91-29. – К., 1991. – 26 с.