

УДК 546.682.86:548.522+621.382.61

**І.А. Большакова**

Керівник Лабораторії магнітних сенсорів Центру “Кристал”

**СЕНСОРИ ТА ПРИЛАДИ  
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ  
В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

© *Большакова І.А., 2002*

**I.A. Bolshakova**

**SENSORS AND DEVICES  
FOR MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELD  
IN EXTREMAL COUDITIONS**

© *Bolshakova I.A., 2002*

**Представлений неперервний ряд досліджень із створення оригінальних магнітовимірювальних засобів: теоретичні та експериментальні дослідження технології вирощування та легування напівпровідникових кристалів  $A_3B_5$ , дослідження їх електрофізичних властивостей та радіаційної стійкості, створення на їх основі мікросенсорів магнітного поля та магнітовимірювальних приладів, використання їх в техніці, космосі та устаткуванні фізики високих енергій.**

**Presents continuous set of investigations and works on creation of original magnetic measurement facilities: theoretical and experimental investigations of  $A_3B_5$  semiconductor crystal growth and doping technology, investigations of their electrophysical properties and radiation resistance, creation of magnetic field microsensors and measuring devices, their application in technique, outer space and high energy physics equipment.**

### **1. Вступ**

Надзвичайно широке використання магнітних полів у багатьох сферах нашого життя – медицині, охороні довкілля, космосі, промисловості, побуті, наукових дослідженнях – викликало бурхливий розвиток магнітовимірювальної апаратури. Сотні фірм у всьому світі – від США до Нової Зеландії – розробляють та випускають сенсори та прилади для вимірювання магнітних полів.

Однак в екстремальних умовах, які часто притаманні магнітним системам, стандартні серійні сенсори та прилади не можуть бути використані. До екстремальних належать радіаційні умови, сильні магнітні поля  $>2T$ , криогенні температури  $\leq 77 K$ , сильно неоднорідні поля, а також дуже малі розміри вимірювального простору в магнітних системах складної конфігурації, при розробці та експлуатації яких необхідно визначити розподіл магнітного поля в просторово обмеженому робочому об'ємі.

У роботі наведені результати досліджень, метою яких була розробка та створення магнітовимірювальних засобів для екстремальних умов експлуатації.

Сенсори магнітного поля, які використовуються в розроблюваних магнітовимірювальних пристроях, виготовляються на основі мікрокристалів напівпровідникових сполук  $A_3B_5$ .

Останніми роками з'явився цілий ряд робіт [1], в яких йдеться про отримання мікро- та нанокристалів у формі віскерів. Інтерес до таких об'єктів пояснюється, з одного боку, тим, що існуюча планарна технологія, як виявилось, має ряд фундаментальних фізичних обмежень. З іншого боку, великий інтерес викликають нові властивості матеріалів, що виникають у зв'язку з розмірними ефектами. Використання мікрокристалічних віскерів – це прямий шлях до створення нового класу приладів.

Мікрокристали InSb, InAs та GaAs у формі віскерів отримуються нами вирощуванням з газової фази. Дослідження фізично-хімічних процесів вирощування мікрокристалів комп'ютерним моделюванням дозволяє оптимізувати технологію отримання їх із заданими властивостями.

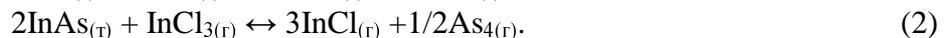
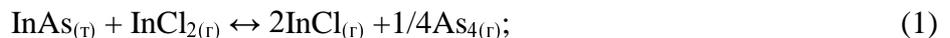
В роботі також наведені результати дослідження властивостей мікрокристалів та радіаційної стійкості виготовлених на їх основі мікросенсорів, а також розробки оригінальних магнітометричних приладів та вимірювальних систем з використанням магнітних сенсорів.

## 2. Моделювання фізико-хімічних процесів вирощування напівпровідникових монокристалів $A_3B_5$ з газової фази

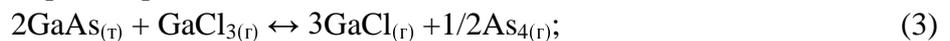
Попереднє моделювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються при вирощуванні напівпровідникових кристалів за допомогою газотранспортних реакцій, допомагає швидше та якісно вирішити питання оптимізації технологічних умов вирощування та одержання кристалів з необхідними електрофізичними властивостями та геометрією.

Вихідними засадами моделювання цих процесів є термодинамічний аналіз складу газової фази хімічних сполук, які утворюються в результаті хімічної взаємодії напівпровідникових матеріалів з транспортним реагентом. Для сполуки InSb як реагент був вибраний  $J_2$ , для InAs і GaAs –  $Cl_2$ .

Термодинамічний аналіз систем InSb- $J_2$ , InAs- $Cl_2$  та GaAs- $Cl_2$  був проведений для закритих контейнерів (ампул), в яких зручно вирощувати мікрокристали напівпровідникових матеріалів. Розрахунки показали, що основними компонентами в газовій фазі системи InAs- $Cl_2$  є InCl, InCl<sub>2</sub>, InCl<sub>3</sub> та As<sub>4</sub>, а основними реакціями, що визначають транспорт InAs в цій системі, є реакції:



Подібна картина спостерігається і для системи GaAs- $Cl_2$ , в якій основними газовими компонентами є три галогеніди галію GaCl, GaCl<sub>2</sub>, GaCl<sub>3</sub> та чотириатомний арсен As<sub>4</sub>, а реакціями, які визначають транспорт GaAs в цій системі, є:



Склад газової фази системи InSb- $J_2$  визначають компоненти InJ, InJ<sub>3</sub>, Sb<sub>4</sub> та Sb<sub>2</sub>, а реакцією, що визначає транспорт InSb в цій системі, є реакція диспропорціонування:



Для отримання оптимальних технологічних режимів вирощування монокристалів були розраховані температурні залежності парціальних тисків компонентів газової фази досліджуваних систем формування системи рівнянь незалежних хімічних реакцій з розрахунком їх констант рівноваги.

На рис. 1 зображені температурні залежності компонентів газової фази для системи  $\text{InAs-Cl}_2$ . Як видно з рис. 1, значення парціальних тисків  $\text{InCl}$  і  $\text{As}_4$  зростають на всьому досліджуваному інтервалі температур, а  $\text{InCl}_3$  плавно зменшується. Парціальний тиск  $\text{InCl}_2$  при температурах вище ніж 780 К різко спадає. Тиск  $\text{As}_2$ , хоча і збільшується із зростанням температури, але за абсолютним значенням він на декілька порядків менше за тиск всіх інших компонентів, тому для даної системи слід враховувати лише молекули  $\text{As}_4$ .

Розрахунки констант рівноваги реакцій (1) і (2) показали, що для цих реакцій в інтервалі температур 850...900 К їх значення наближуються до одиниці, що є умовою інтенсивного транспортування компонентів через газову фазу. Тому за оптимальну температуру зони джерела слід прийняти температуру не нижче ніж 850 К. При менших температурах близько 740...760 К значення константи рівноваги для цих реакцій змінюється на 2–3 порядки, що є достатньою умовою ефективності транспортного процесу. Ця температура може бути рекомендована як оптимальна температура зони кристалізації  $\text{InAs}$ , оскільки при подальшому зменшенні температури спостерігається значний ріст парціальних тисків  $\text{InCl}_2$  і  $\text{InCl}_3$ , що призводить до зміщення рівноваги реакцій (1) і (2) у бік утворення монохлориду індію.

У зв'язку з тим, що для отримання напівпровідникових кристалів з потрібними характеристиками використовується легування їх певними домішками під час вирощування, були проведені розрахунки систем  $\text{InAs-Cl}_2$  та  $\text{InSb-J}_2$  з врахуванням легуючої донорної домішки  $\text{Sn}$ . При розрахунках системи з легуючими домішками слід прийняти до уваги, що в газовій фазі таких систем будуть утворюватись галогеніди самої домішки. У випадку системи  $\text{InAs-Sn-Cl}_2$  це будуть  $\text{SnCl}_2$  і  $\text{SnCl}_4$ , а перенесення олова відбуватиметься за реакцією диспропорціонування:



Проведені розрахунки показали, що введення легуючого компонента практично не впливає на характер температурної залежності парціальних тисків газових компонентів системи, але при цьому спостерігається зменшення абсолютних значень тисків приблизно на півпорядку. З цього можна зробити висновок, що введення легуючого олова у систему  $\text{InAs-Cl}_2$  буде сповільнювати масопереніс основних компонентів.

Розрахунки системи  $\text{InSb-Sn-J}_2$  показали, що рекомендованою температурою для зони кристалізації є 780 К; температура зони джерела повинна бути на 300 К вищою для забезпечення достатнього масопереносу, тобто 1 080 К. Однак, в зв'язку з тим, що парціальні тиски компонентів газової фази системи  $\text{InSb-Sn-J}_2$  за абсолютними значеннями значно менші за парціальні тиски компонентів газової фази системи  $\text{InAs-Sn-Cl}_2$ , ріст кристалів  $\text{InSb}$  повинен відбуватися також значно повільніше.

Що стосується системи  $\text{GaAs-Cl}_2$ , то розрахунки констант рівноваги для реакцій (3), (4) дозволили визначити оптимальну температуру зони джерела не нижче ніж 1 000 К, а зони кристалізації близько 850 К.

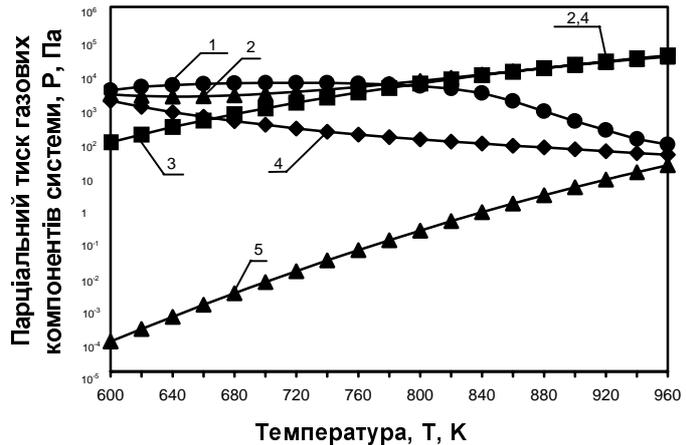


Рис. 1. Температурна залежність парціальних тисків газових компонентів системи:

1 –  $\text{InCl}_2$ , 2 –  $\text{As}_4$ , 3 –  $\text{InCl}_3$ , 4 –  $\text{InCl}$ , 5 –  $\text{As}_2$

Експерименти із вирощування мікрокристалів InSb, InAs та GaAs в досліджених системах показали правильність проведених розрахунків та отриманих рекомендацій як по температурних режимах технологічних процесів, так і по швидкості росту кристалів.

### 3. Експеримент. Вирощування мікрокристалів напівпровідників $A_3B_5$

Мікрокристали InSb, InAs та GaAs були отримані з парової фази методом хімічних транспортних реакцій з використанням галогенів. Саме технологія газотранспортних реакцій надає можливість одержувати мікрокристали із досконалою кристалічною структурою і поверхнею, високою відтворюваністю електрофізичних властивостей.

Мікрокристали InSb вирощувалися в йодидній системі в закритих кварцевих ампулах при таких технологічних параметрах: температура зони джерела 1 080 К, температура зони росту 780 К, концентрація йоду в ампулі  $3 \text{ мг/см}^3$ , швидкість росту  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ . Енергія кристалізації, розрахована з використанням методу математичного моделювання, становить  $63,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ . Тривалість технологічного процесу 24 години.

Розміри отриманих кристалів: довжина 5–10 мм, ширина 0,05–0,10 мм, товщина 0,01–0,02 мм. Форми росту – ниткоподібні (віскери), напрямок росту  $\langle 211 \rangle$  або  $\langle 111 \rangle$ , поверхня граней дзеркальна.

Цілеспрямовані зміни електрофізичних властивостей мікрокристалів забезпечуються легуванням їх певними домішками або комплексами домішок під час вирощування. У випадку InSb легуючі домішки вибиралися з умови, щоби вони забезпечували електронний тип провідності, потрібний для виготовлення мікросенсорів магнітного поля холлівського типу. Найбільш широко використовуються донорні домішки телур та олово.

Для створення надалі мікросенсорів на основі кристалів, які повинні мати підвищену стійкість до радіаційного опромінення, як основну донорну домішку використовувалося олово. Залежність концентрації носіїв в кристалах від вмісту домішки Sn в контейнері можна змінювати в широких межах від  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , як це показано на рис. 2.

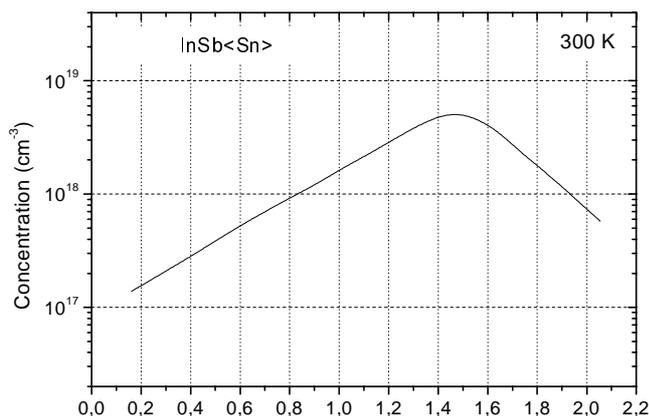


Рис. 2. Залежність концентрації вільних електронів в мікрокристалах InSb від вмісту основної легуючої домішки Sn

Але максимальне значення концентрації вільних електронів близько  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  досягається при вмісті олова в ростовому контейнері близько  $1,5 \text{ мг/см}^3$ . Збільшення вмісту Sn вище вказаної величини призводить до зменшення результуючої концентрації вільних електронів, у чому проявляється амфотерний характер цієї домішки.

В основу концепції підвищення радіаційної стійкості холлівських магнітних сенсорів покладено вимоги щодо розробки технологічних заходів отримання напівпровідникових мікрокристалів  $A_3B_5$

з якісно вищим рівнем стійкості їх електрофізичних параметрів до радіаційного опромінення. Реалізація цього підходу ґрунтується на двох основних гіпотезах. Перша з них передбачає можливість створення радіаційностійкого напівпровідникового матеріалу забезпеченням оптимальної концентрації носіїв заряду. Згідно із теорією загальної електро-

нейтральності кристала [2] для кожного матеріалу існує оптимальний рівень концентрації носіїв заряду, при якому відбувається фіксування рівня Фермі, а вплив зовнішніх факторів на електрофізичні властивості зводиться до мінімуму. Друга гіпотеза передбачає можливість підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових мікрокристалів за допомогою створення в їх об'ємі стоків первинних радіаційних дефектів у вигляді локальних флуктуацій кристалічного потенціалу, що виникають за рахунок деформації кристалічної ґратки. Створене таким чином електричне поле має здатність акумулювати первинні радіаційні дефекти та суттєво впливати на інтенсивність процесів дефектоутворення в напівпровідниковому кристалі під час опромінення [3].

Технологічне об'єднання викладених вище гіпотез може бути реалізовано у методі комплексного металургійного легування мікрокристалів під час їх росту складними домішковими комплексами. При цьому передбачається, що домішковий комплекс міститиме основну домішку з донорним характером електричної поведінки для забезпечення необхідного рівня концентрації носіїв заряду, а також набір спеціальних домішок, сумарний вплив яких на властивості напівпровідникового матеріалу проявлятиметься у підвищенні його радіаційної стійкості.

Комплексне легування мікрокристалів InSb проводили під час їх росту. При цьому корекція технологічних умов росту мікрокристалів (якісного та кількісного складу шихти, кількості транспортуючих галогенів, температури кристалізації та ін.) здійснювалась згідно із фізико-хімічними властивостями домішок, що вводилися. Проводились дослідження впливу різноманітних легуючих домішок (Sn, Mn, Cr, Au, Al, Yb та ін.) на ріст, структурну досконалість та електрофізичні властивості мікрокристалів InSb.

Проведені дослідження дозволили вибрати оптимальний домішковий комплекс для легування мікрокристалів InSb, враховуючи перспективи наступного практичного використання цих мікрокристалів в сенсорах магнітного поля, стабільних у радіаційних умовах: основна легуюча домішка Sn, додаткові легуючі домішки Al та Cr. При цьому було враховано, по-перше, що в результаті радіаційних перетворень In кінцевим продуктом ядерних реакцій стає Sn. По-друге, легування ізовалентною домішкою Al, ковалентний радіус атомів якої суттєво відрізняється від ковалентних радіусів основних атомів ґратки кристала, призводить до деформації кристалевого потенціалу. А створення комплексом таких атомів поля пружних деформацій призводить до створення стоків для радіаційних дефектів, що позитивно впливає на радіаційну стійкість кристалів. Вплив домішки хрому позитивно впливає на часову стабільність характеристик, як показали численні експериментальні дослідження [4]. Результати досліджень радіаційної стійкості мікросенсорів магнітного поля, виготовлених на основі комплексно легуваних мікрокристалів InSb, будуть наведені в наступних розділах.

Мікрокристали InAs вирощувалися також в закритих контейнерах, але з використанням HCl як транспортуючий агент. Температурний режим при вирощуванні InAs, на відміну від InSb, був двостадійним. На першій стадії температура зони джерела становила 890 K, температура зони кристалізації – 850 K, тривалість процесу була 0,5 год, при цьому в зоні кристалізації утворювався шар полікристалів, які були в наступній стадії центрами зародкоутворення для наступного росту віскерів. Наступна стадія технологічного процесу тривала 2–3 години при температурі зони кристалізації 760 K. Отримані кристали InAs показані на рис. 3. Їх розміри: довжина 10 мм, ширина 0,5 мм, товщина 0,1 мм.

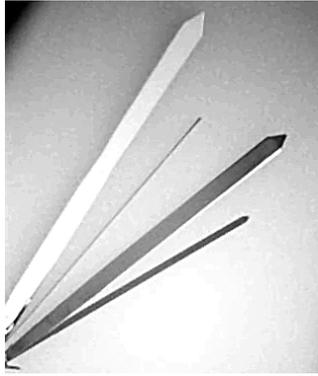


Рис. 3. Фотографія мікрокристалів InAs, отриманих у закритій системі

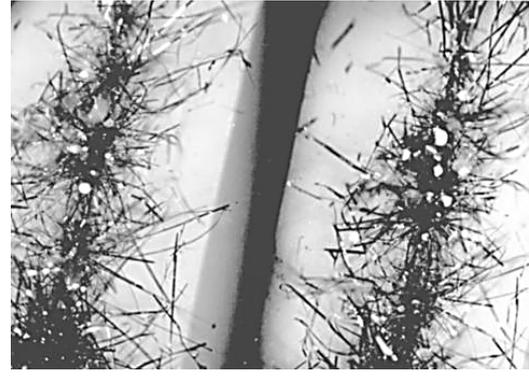


Рис. 4. Фотографія мікрокристалів GaAs, отриманих у відкритій системі

Мікрокристали GaAs були отримані в проточній системі з використанням HCl та потоку водню як газ-носії. Температурний режим вирощування становив 1050 K в зоні джерела та 900 K в зоні кристалізації, тривалість всього процесу 2–3 год. Отримані мікрокристали показані на рис. 4. Вони мають форму тонких 0,007 мм завтовшки напівпрозорих лент завдовжки до 5 мм та завширшки 0,1 мм.

#### 4. Дослідження електрофізичних властивостей легованих мікрокристалів InSb

Серед напівпровідників  $A_3B_5$  антимонід індію має найвище значення рухливості носіїв заряду, тому він становить найбільший інтерес для створення сенсорів магнітного поля. Розроблена технологія вирощування та легування мікрокристалів InSb дозволяє отримувати її в широкому діапазоні концентрацій носіїв заряду. Отримані кристали мають досить високий ступінь структурної досконалості як в об'ємі, так і на поверхні. Це підтверджується дослідженнями їх механічної міцності (рис. 1), в яких встановлено, що опір розриву мікрокристалів при малих діаметрах наближається до значень, розрахованих для ідеальної ґратки цього кристала, яка становить  $1180 \text{ кГ/мм}^2$ . На рис. 6 показана поверхня торців кристалів InSb з діаметром від 3 до 4 мкм після розриву по площині спайності.

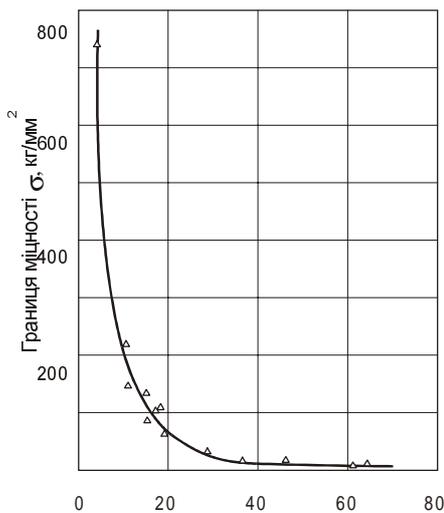


Рис. 5. Міцність мікрокристалів InSb при різних діаметрах та легуючих домішках InSb ( $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ )

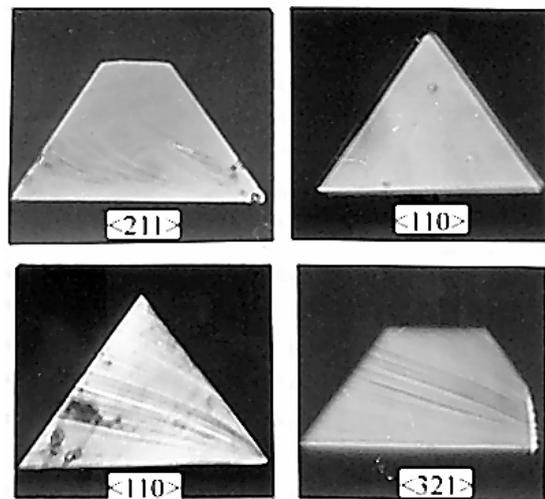


Рис. 6. Фотографії поперечного перерізу мікрокристалів InSb після розриву (діаметр 3–4 мкм)

Електрофізичні властивості мікрокристалів InSb, такі, як тип провідності, рухливість носіїв, постійна Холла, питомий опір залежать від типу та концентрації легуючих домішок.

На рис. 7 наведені температурні залежності постійної Холла та рухливості носіїв в мікрокристалах InSb, легованих донорною домішкою Te. Вони використовуються для створення мікросенсорів магнітного поля в широкому інтервалі температури (4,2–400 К) та індукції ( $10^{-4}$  Т–10 Т).

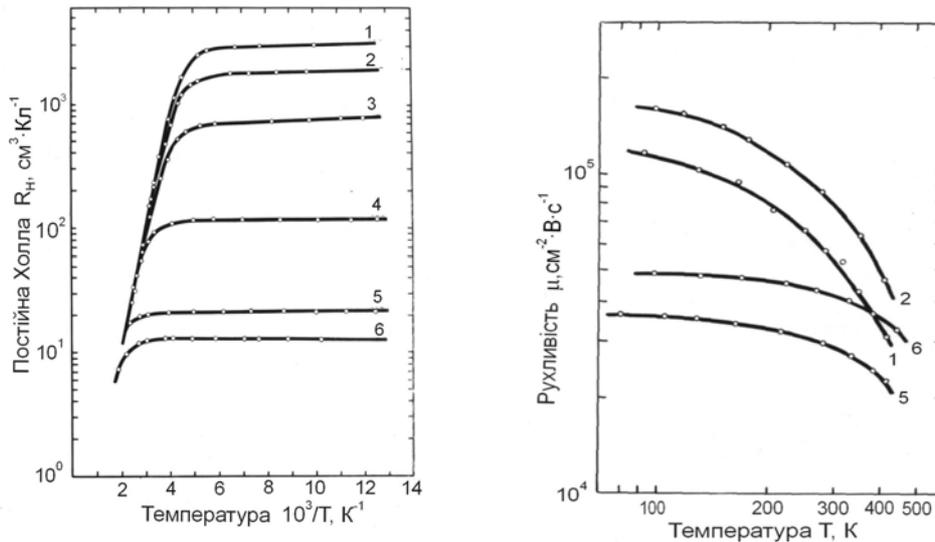


Рис. 7. Температурні залежності постійної Холла (а) та рухливості (в) в мікрокристалах InSb, легованих телуром до концентрацій:

1– $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>; 2– $3,6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>; 3– $8,6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>; 4– $5,3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>; 5– $2,9 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>; 6– $4,7 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>

Для використання в сенсорах, що призначені для таких екстремальних умов експлуатації, як радіаційні навантаження, вирошено та досліджено мікрокристали InSb, леговані комплексом домішок, серед яких є основна донорна домішка Sn та дві додаткові домішки Al та Cr. На рис. 8 показані температурні залежності постійної Холла та рухливості в мікрокристалах InSb, легованих Sn, Sn:Al, Sn:Cr, Sn:Al:Cr.

Вплив цих домішок на електрофізичні властивості мікрокристалів InSb пов'язаний з особливостями їх поведінки в цьому напівпровідниковому матеріалі.

Олово, будучи амфотерною домішкою в InSb, проявляє в основному донорні властивості. В діапазоні концентрацій  $N = 4 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> ступінь компенсації матеріалу  $K_i = N_d/N_A$  становить  $\sim 0,20$ , що відповідає розподілу атомів олова в підгратках індію та сурми у співвідношенні 5:1 [5]. При вищих концентраціях олова ступінь компенсації зростає, що проявляється у зменшенні концентрації носіїв заряду, як це було показано на експериментальній кривій рис. 2.

Алюміній є ізовалентною домішкою в InSb, яка заміщає атоми в підгратці індію. Тому, не вводячи додаткові енергетичні рівні в заборонену зону напівпровідника, він може взаємодіяти із залишковим домішковим фоном. Така взаємодія може відбуватися в рідкій фазі, якщо вона присутня при рості кристала, в результаті чого в кристал, який росте, буде попадати менша кількість фонових домішок. Така ж взаємодія може відбуватися і в твердій фазі, і тоді ефект “очищення” кристала буде реалізовуватися за рахунок утворення стійких асоційованих дефектів між взаємодіючими атомами. В такому випадку алюміній, як і інші ізовалентні домішки, сприяє переходу залишкових домішок в неактивний стан. Крім того,

як було зазначено вище, різниця в розмірах ковалентних радіусів атомів Al (1,43) та In (1,63) неодмінно призводить до деформації кристалічної ґратки, за рахунок чого виникають локальні флуктуації кристалічного потенціалу, які відіграють роль стоків для первинних радіаційних дефектів, що позитивно впливає на радіаційну стійкість кристалів. Вплив Al на електрофізичні властивості мікрочисталів InSb проявляється в зміні ширини забороненої зони в області змішаної провідності, як це можна визначити з нахилу кривих залежності  $R_H = f(10^3/T)$  на рис. 8, а для зразків, легованих алюмінієм (зразки 5, 6, 8).

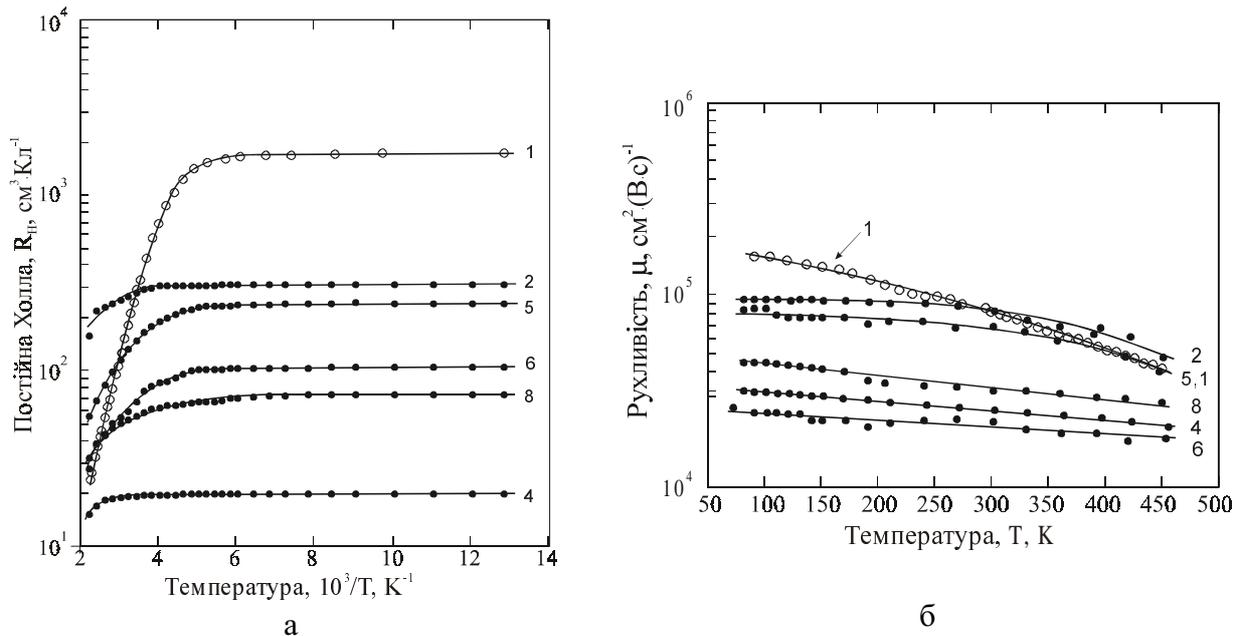


Рис. 8. Температурні залежності постійної Холла (а) та рухливості (б)

в комплексно легованих мікрочисталах InSb:

1 – InSb ( $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), 2 – InSb<Sn> ( $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), 4 – InSb<Sn,Cr> ( $3,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ),

5 – InSb<Sn,Al> ( $3,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), 6 – InSb <Sn,Al> ( $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ),

8 – InSb<Sn,Al,Cr> ( $6,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) (концентрації вказані при 298 К)

Хром, який утворює в InSb глибокі донорні рівні, не проявляє помітного впливу на електрофізичні властивості кристалів (рис. 8, зразок 4). Тим не менше, помічено, що домішки хрому позитивно впливають на часову стабільність характеристик кристалів, це пов'язано з тим, що, маючи незаповнені внутрішні 3d оболонки, він може взаємодіяти з фоновими домішками, сприяючи переходу їх в неактивний стан.

Отже, розміри, форми, механічні та електрофізичні властивості вирощених мікрочисталів при певних підібраних домішках, введених під час вирощування, дозволяють створити на їх основі мікросенсори з контрольованими властивостями, які можуть задовольняти різноманітним умовам використання.

## 5. Мікросенсори магнітного поля.

### Дослідження в екстремальних умовах опромінення швидкими нейтронами

На основі мікрочисталів антимоніду індію виготовлені магнітні мікросенсори. Досконалість структури та поверхні мікрочисталів, а також можливість отримувати їх з заданими розмірами та формою, дозволяють усунути в технологічному процесі виготовлен-

ня сенсорів такі операції, як попереднє оброблення кристалів (різання, шліфування, травлення). Це дає можливість не тільки спростити технологічний процес виготовлення, а й покращити характеристики сенсорів. Отже, мікрочастинки згаданих напівпровідників є готовими чутливими елементами для створення на їх основі мікросенсорів.

Виготовлені мікросенсори можна використовувати в широкому інтервалі температур, включаючи криогенні. Геометричні розміри мікросенсорів:  $0,05 \times 0,05 \times 0,02$  мм<sup>3</sup> або  $0,15 \times 0,06 \times 0,03$  мм<sup>3</sup>, отже, об'єм найменших чутливих елементів не перевищує  $5 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>, вага  $10^{-6}$  г, споживана потужність  $10^{-9}$  Вт. Конструювання зондів з мікросенсорами проводиться в кожному випадку окремо, враховуючи особливості кожної вимірювальної задачі та конфігурацію магнітної системи, для використання в якій вони призначені. Для вимірювання в соленоїдах та отворах з малими розмірами були виготовлені аксіальні зонди із зовнішнім діаметром корпусу 0,8 мм. Для вимірювання у вузьких щілинах розроблені та виготовлені плоскі зонди з титанової фольги завтовшки 0,05 мм. Розміри таких зондів: товщина 0,1 мм, ширина 3 мм, довжина від 40 мм. На таких плоских зондах розташовують два мікросенсори для диференційного вимірювання магнітної індукції в сильно неоднорідних магнітних полях.

Створені на основі мікрочастинки InSb мікросенсори магнітного поля можна розділити на три групи за їх характеристиками:

#### Технічні характеристики магнітних мікросенсорів

Матеріал	InSb		
	IS-1	IS-2	IS-3
Група сенсорів	IS-1	IS-2	IS-3
Концентрація $n$ , см <sup>-3</sup>	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{18}$
Магнітна чутливість $K_B$ , мВ·Тл <sup>-1</sup>	40	35	9
Номінальний струм $I$ , мА	5	25	60
Вхідний опір $R_{вх}$ , Ом	10	5	1,4
Вихідний опір $R_{вих}$ , Ом	5	2	1
Залишкова напруга $U_0$ , мВ	0,07	0,07	0,03
Коефіцієнт нелінійності $K_N$ , %	1,5	1,0	≤1,0
Температурний коефіцієнт $T_{KB}$ , %·град <sup>-1</sup>	1,8	0,05	0,05

Магнітні сенсори, виготовлені на основі напівпровідникових мікрочастинки, та вимірювальні зонди з ними є найменшими з-поміж існуючих у світі. Вони задовольняють вимоги мінімізації габаритів, ваги та споживаної потужності. Можливість керувати властивостями кристалів в широких межах під час їх вирощування забезпечує виготовлення мікросенсорів на їх основі з набором характеристик у значному інтервалі.

Так, для вимірювання індукції (В) слабких магнітних полів близько  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Тл використовують чутливі елементи з антимоніду індію з концентрацією носіїв  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>; для магнітних полів  $5 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-1}$  Тл потрібна концентрація носіїв  $3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>; для сильних магнітних полів 2–12 Тл при фіксованій температурі –  $(3-4) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а в широкому інтервалі температури –  $(2-6) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 9 показана залежність холлівської напруги мікросенсорів від магнітної індукції в сильних магнітних полях 2–11 Тл при фіксованих температурах 77 К та 293 К для мікросенсорів магнітного поля з концентрацією носіїв  $4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

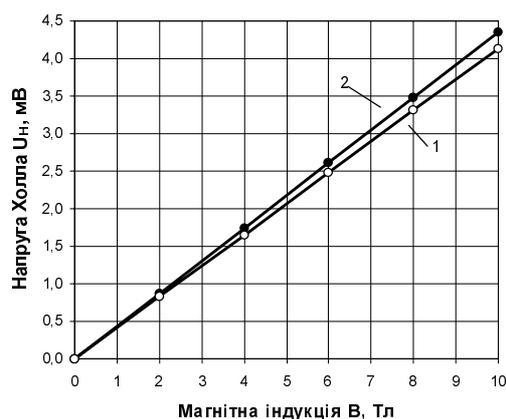


Рис. 9. Польова залежність вихідного сигналу мікросенсора ( $n = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) в сильних магнітних полях:  
1 – при 298 К, 2 – при 77 К

Як було показано вище, для забезпечення радіаційної стійкості мікрокристалів InSb використовувався метод комплексного металургійного легування їх під час росту, в якому як основна донорна домішка використовувалося олово, а як додаткові домішки – алюміній та хром. При виборі Sn як основної легуючої домішки в опромінюваних зразках враховувалась та обставина, що частка теплових нейтронів у потоці швидких нейтронів з середньою енергією  $E > 1,5 \text{ MeV}$  як правило становить 10 %. Оскільки кількість атомів основної легуючої домішки знаходиться в межах від  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  ат. %, то можна очікувати помітної зміни складу та характеристик напівпровідника за рахунок радіаційної модифікації домішкових атомів. Використання Sn дає змогу зменшити вплив радіаційної модифікації, оскільки під час захвату теплових нейтронів індій перетворюється в олово, яке є основною донорною домішкою в SnSb. Отже, легування оловом не призводить до відчутних змін електричних характеристик кристалів SnSb. Що ж стосується домішок Al та Cr, то їх роль у покращанні радіаційної стійкості була обговорена в попередніх розділах.

Визначення впливу опромінення швидкими нейтронами на характеристики кристалів та сенсорів проводилося вимірюванням їх до та після опромінення на високопрецизійних вимірювальних стендах з похибкою 0,01–0,03 %, які були спеціально для цієї задачі розроблені та виготовлені в Лабораторії магнітних сенсорів і будуть описані в наступному розділі. Радіаційна стійкість мікрокристалів оцінювалася за величиною зміни після опромінення швидкими нейтронами основних характеристик: концентрації носіїв заряду, їх рухливості, питомого опору, а для мікросенсорів – за їх магнітною чутливістю.

Нижче наведено результати вивчення впливу різних флюенсів швидких нейтронів ( $0,9 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ) на характеристики мікрокристалів InSb<Sn> (рис. 10–13).

На рис. 10 показана відносна зміна концентрації носіїв заряду під дією опромінення швидкими нейтронами із середньою енергією 1,35 MeV в кристалах InSb<Sn> з різними вихідними концентраціями, починаючи від  $(2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , для трьох різних флюенсів швидких нейтронів  $\Phi = 0,9 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ . На рисунку видно тенденцію до зменшення відносної зміни концентрації із збільшенням вихідної концентрації в зразках, такий характер залежності зберігається для всіх 3-х

**Дослідження радіаційної стійкості мікросенсорів** проводилося вивченням впливу на їх характеристики опромінення реакторними нейтронами, які створюють найбільші пошкодження в кристалевій ґратці напівпровідників. Експерименти з опромінення проводилися на швидкому імпульсному реакторі ІБР-2 в Лабораторії нейтронної фізики об'єднаного інституту ядерних досліджень в м. Дубна, Росія. Опромінення проводилось швидкими нейтронами з енергією  $E = 0,1-13 \text{ MeV}$ , інтенсивністю  $(2-3) \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  до флюенсів  $10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $10^{16} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ . Всі дослідження проводились при кімнатній температурі, всього було опромінено понад 400 зразків мікрокристалів InSb та мікросенсорів з різним ступенем легування та різними комплексами легуючих домішок.

флюенсів швидких нейтронів. В той же час, при збільшенні дози нейтронного опромінення, зміна концентрацій зростає у всьому діапазоні вихідних концентрацій, що пов'язано із радіаційно стимульованим виникненням в об'ємі мікрокристалів InSb дефектів та областей розупорядкування з електронним типом провідності.

Цей висновок підтверджується також результатами дослідження впливу опромінення швидкими нейтронами на величину рухливості носіїв заряду (рис. 11) та питомий опір зразків (рис. 12). З рисунків випливає, що із зростанням дози опромінення рухливість зменшується, а питомий опір зростає, однак концентраційна залежність цих параметрів зберігає свою форму. При цьому величина зміни як питомого опору, так і рухливості найбільша для слабколегованих кристалів.

Отримані результати можна пояснити тим, що під дією нейтронного опромінення в об'ємі напівпровідникових мікрокристалів утворюються області розупорядкування, які виступають в ролі додаткових центрів розсіювання носіїв заряду, що й спричиняє зменшення їх рухливості та приводить до зростання питомого опору.

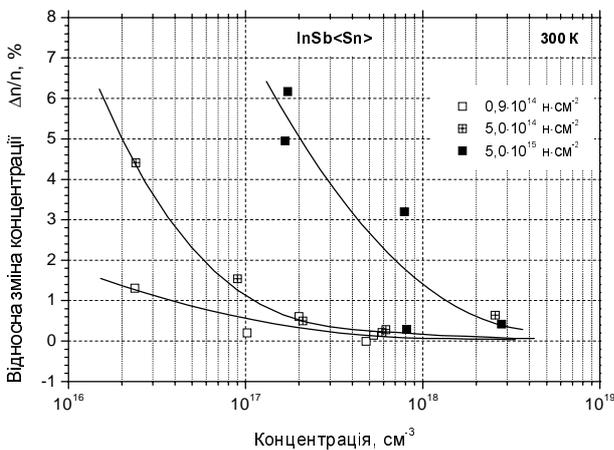


Рис. 10. Відносна зміна концентрації носіїв заряду у мікрокристалах InSb<Sn> після опромінення швидкими нейтронами

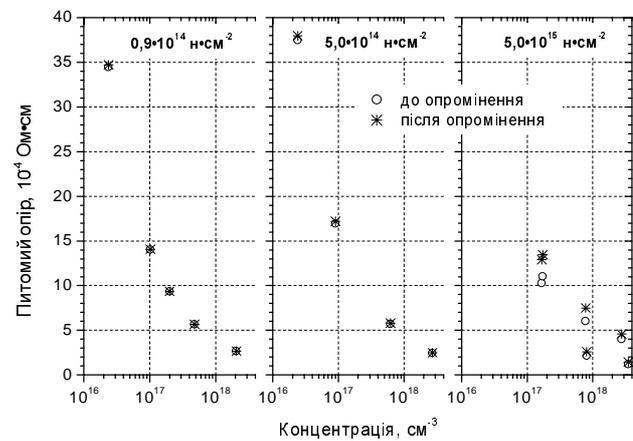


Рис. 11. Концентраційна залежність питомого опору мікрокристалів InSb<Sn> до та після опромінення швидкими нейтронами

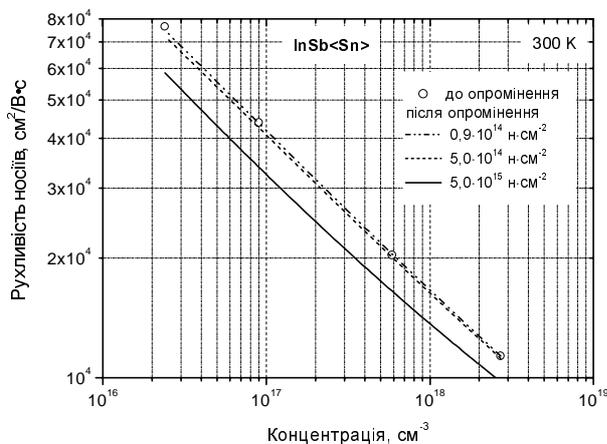


Рис. 12. Зміна рухливості носіїв заряду у мікрокристалах InSb<Sn> під впливом опромінення швидкими нейтронами

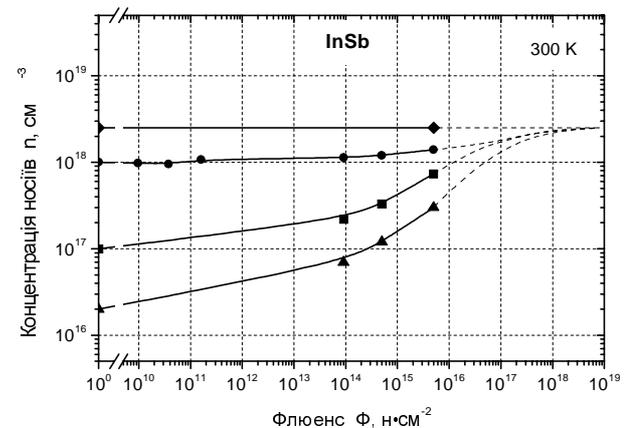


Рис. 13. Залежність концентрації носіїв заряду у мікрокристалах InSb від флюенсу швидких нейтронів. Суцільні лінії – експериментальні результати, пунктирні лінії – екстраполяція

З експериментально отриманих залежностей концентрації носіїв заряду від дози нейтронного опромінення (рис. 13) можна екстраполяцією знайти ту концентрацію носіїв заряду, при якій для даного напівпровідникового матеріалу відбувається фіксація рівня Фермі і вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів стає незначним. Такою концентрацією для мікрокристалів  $\text{InSb}\langle\text{Sn}\rangle$ , як це видно з рис.13, є  $n = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Така концентрація носіїв є оптимальною в кристалах  $\text{InSb}$ , при якій зміна основних параметрів матеріалу навіть при великих дозах радіаційного опромінення стає мінімальною. Ці результати добре узгоджуються з даними Н. Коліна [6] для іншого напівпровідника цієї групи  $\text{InAs}$ , для якого оптимальною концентрацією є  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Значення найменших змін основного параметру концентрації носіїв знаходиться на рівні точності вимірювальних стендів і становить 0,01–0,03 %.

Як було показано вище, комплексне легування мікрокристалів  $\text{InSb}$  додатковими домішками  $\text{Al}$  та  $\text{Cr}$  дає змогу дещо підвищити рухливість носіїв заряду, що позитивно впливає на чутливість мікросенсорів, а також покращати часову стабільність їх характеристик. Результати дослідження впливу опромінення швидкими нейтронами на комплексно леговані мікрокристали  $\text{InSb}$  показані на рис. 14–16.

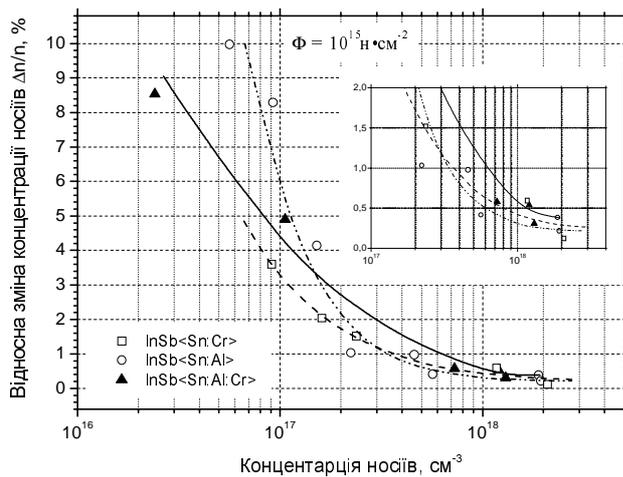


Рис. 14. Відносна зміна концентрації носіїв  $\Delta n/n$  залежної від вихідних концентрацій в мікрокристалах  $\text{InSb}$  після опромінення до флюенса  $10^{15} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$

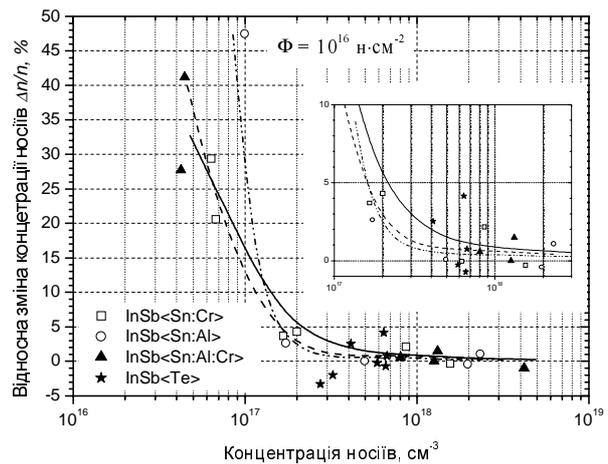


Рис. 15. Відносна зміна концентрації носіїв  $\Delta n/n$  для різних вихідних концентрацій в мікрокристалах  $\text{InSb}$  після опромінення до флюенса  $10^{16} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$

На рис. 14 та 15 наведені результати дослідження відносної зміни концентрації носіїв для 3-х складів домішкових комплексів  $\text{InSb}\langle\text{Sn:Cr}\rangle$ ,  $\text{InSb}\langle\text{Sn:Al}\rangle$   $\text{InSb}\langle\text{Sn:Al:Cr}\rangle$  після опромінення їх високими дозами швидких нейтронів до флюенсів  $10^{15} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$  та  $10^{16} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ .

На рис. 16 зображені криві відносної зміни рухливості при опроміненні до флюенса  $10^{16} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ . Найменша зміна рухливості носіїв спостерігається для  $\text{InSb}\langle\text{Sn:Al:Cr}\rangle$  в більшій частині досліджуваного інтервалу концентрацій. Це може бути підтвердженням існуючої гіпотези про гетерування алюмінієм фонових домішок, зокрема кисню, який має негативний вплив на радіаційну стійкість кристалів  $\text{A}_3\text{-B}_5$ .

На рис. 15 і 16 окремими точками (зірочками) позначені дані для мікрокристалів  $\text{InSb}$ , легованих телуrom (Te). Ясно видно, що мікрокристали  $\text{InSb}\langle\text{Te}\rangle$  за радіаційною стійкістю помітно поступаються мікрокристалам  $\text{InSb}\langle\text{Sn:Al:Cr}\rangle$ .

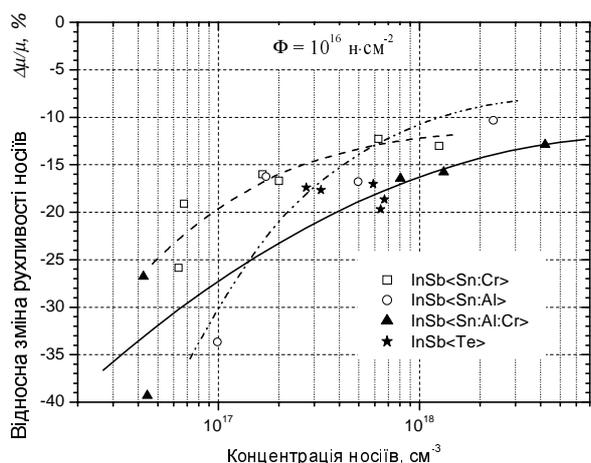


Рис. 16. Відносна зміна рухливості носіїв для різних вихідних концентрацій в мікрокристаллах InSb після опромінення до флюенса  $10^{16}$  н·см<sup>-2</sup>

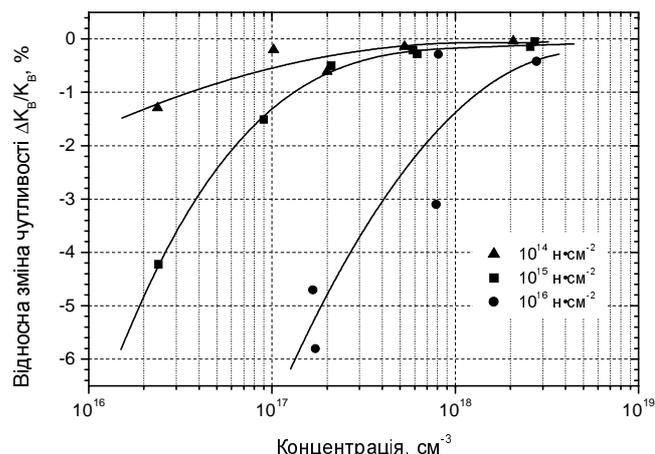


Рис. 17. Концентраційна залежність відносної зміни магнітної чутливості мікросенсорів після опромінення різними флюенсами швидких нейтронів

Як це видно з рис. 14 та 15, відносна зміна концентрації носіїв заряду для всіх досліджуваних домішкових комплексів в мікрокристаллах InSb прямує до мінімальних значень при вихідних концентраціях у матеріалі  $2,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. До того ж така тенденція спостерігається для всіх флюенсів.

Характеристики мікросенсорів магнітного поля, створених на основі вирощених та досліджених мікрокристалів, є стійкими до радіаційного опромінення аж до найвищих флюенсів швидких нейтронів (рис. 17), за умови, що загальна концентрація носіїв в кристалах чутливих елементів цих сенсорів наближується до оптимальної  $2,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

Отримані мікрокристали та виготовлені на їх основі мікросенсори були використані в магнітовимірювальній системі для моніторингу магнітного поля в прискорювачах заряджених частинок та у відкритому космосі в системі керування стабілізацією та орієнтації супутників, про що буде йти в наступних розділах.

## 6. Метрологічне забезпечення досліджень

Метрологічне забезпечення є необхідною вимогою проведення робіт, пов'язаних з ефективною розробкою сенсорів та приладів. Тому в Лабораторії магнітних сенсорів цьому питанню приділяється велика увага. Крім високоточних сучасних приладів, таких, як нановольтметри Keithly-2000, Keithly-2182 (США) та гауссметр LakeShore 450 (США), в лабораторії є 5 вимірювальних стендів з різним призначенням та різною точністю вимірювання. Серед них повний вимірювальний комплекс для визначення параметрів напівпровідникових матеріалів та сенсорів Hall Measurement System HMS 7504 (США) з точністю до 1 % та магнітним полем до 3Т, стенд Н-3 для поточних контрольних вимірювань з точністю 1,5 %, стенд Н-4 з точністю 0,03 % для дослідження кристалів до та після опромінення та два спеціально розроблені стенди ТІ-1 та ТІ-2 для дослідження характеристик розроблюваних сенсорів та приладів з високою точністю.

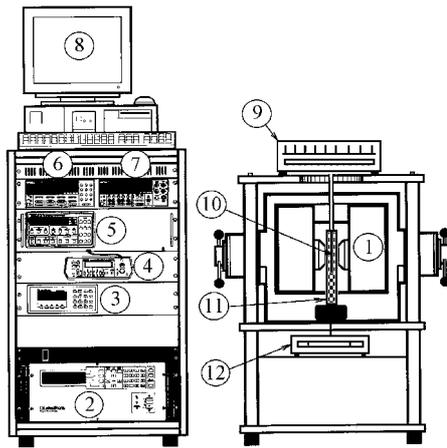


Рис. 18. Склад станда TI-1 (на основі HMS-7504):  
 1 – EM4; 2 – LakeShore 647; 3 – 450 гауссметр;  
 4 – Keithley 485 Autoranging Picoammeter;  
 5 – Keithley 220; 6 – 7001 Switch System;  
 7 – 2000 Multimeter; 8 – PC IEEE-488 card;  
 9 – комутатор; 10 – багатопозиційна підкладка;  
 11 – термостат; 12 – контролер термостата

який розміщено на спільній з досліджуваними мікросенсорами підкладці) підвищено точність вимірювання до 0,1 %.

Станд TI-2 призначений для високоточних вимірювань зміни характеристик мікросенсорів після впливу на них радіаційного опромінення з похибкою не більше ніж 0,01 %. Така висока точність досягається завдяки спеціальним методам вимірювання, які дозволяють скомпенсувати завади вимірювального кола, розробці високоефективного пристрою попередньої обробки сигналу, використанню останньої моделі сучасного нановольтметра Keithly-2152. Крім того, вимірювання в стенді проводяться при фіксованій величині магнітного поля у високостабільній малогабаритній магнітній мірі, яка термостатується з точністю краще ніж 0,1°C разом із вимірюваним зразком.

До складу обох стендів входять персональні комп'ютери з передачею інформації по інтерфейсних шинах IEEE-488. Для кожного станда створено спеціальне програмне забезпечення (рис. 19), яке дає змогу автоматизувати процеси керування стендами, збору, обробки та графічної візуалізації результатів.

## 7. Впровадження мікросенсорів магнітного поля у розробки новітніх магнітовимірювальних пристроїв та систем

Нижче викладені нові підходи та принципи дії магнітовимірювальних пристроїв, розроблених з використанням сенсорів магнітного поля.

**Інтелектуальна система моніторингу магнітного поля для радіаційних умов експлуатації (Система моніторингу).** Задача створення такої системи виникла у зв'язку з

Станд TI-1 призначений для проведення масових досліджень польових характеристик мікросенсорів з точністю 0,1 % та параметрів розроблюваних приладів під час їх виготовлення. Він створений на основі HMS-7504 та складається з блоків, показаних на рис. 18. Але порівняно з HMS-7504 має ряд суттєвих переваг.

По-перше, завдяки виготовленню 10-канального комутатора забезпечено суттєво вищу продуктивність вимірювань: за один цикл одночасно проводиться вимірювання 10-ти мікросенсорів, один з яких є еталонним. По-друге, завдяки термостабілізації мікросенсорів, використання попередніх підсилювачів сигналу та спеціальному режиму кореляційного вимірювання (відносно еталонного мікросенсора,

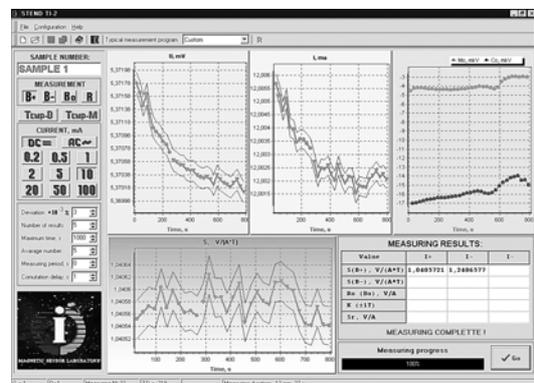


Рис. 19. Головне робоче вікно програми Soft\_TI-2

необхідністю вимірювання магнітного поля з високою точністю в прискорювачах заряджених частинок під час тривалих експериментів. У відомих міжнародних дослідницьких центрах, таких, як CERN (Швейцарія), DESY (Німеччина), ОУЯД (Росія) тощо магнітне поле в детекторах прискорювачів під час експерименту з радіаційними пучками не вимірюється, тому що всі відомі напівпровідникові прилади під дією іонізуючого опромінення є нестабільними. При розрахунках використовується значення магнітного поля, виміряного до початку експерименту, тобто до запуску пучка заряджених частинок.

Моніторинг магнітного поля в прискорювачах заряджених частинок передбачає ряд специфічних особливостей щодо магнітометричних приладів (ММП). Серед них найважливішими є тривала висока радіаційна стійкість сенсорів, завадостійкість, точність та стабільність в умовах експерименту в прискорювачах.

В матеріалах даної роботи подані нові підходи у розробці магнітометричних пристроїв на холлівських сенсорах для прискорювачів заряджених частинок. На відміну від магнітометричних пристроїв на ЯМР-перетворювачах, які є традиційними для задач вимірювання магнітного поля в прискорювачах заряджених частинок, пристрої на холлівських сенсорах характеризуються рядом переваг. По-перше, холлівські сенсори можуть працювати при неоднорідних магнітних полях. Ця перевага холлівських сенсорів має особливу актуальність в детекторах заряджених частинок, магнітне поле в яких є неоднорідним. По-друге, малі розміри холлівських сенсорів дозволяють реалізувати багатоканальні вимірювальні пристрої без притаманних для ЯМР-перетворювачів проблем просторового обмеження. По-третє, холлівські сенсори дозволяють вимірювати як абсолютне значення, так і напрям індукції магнітного поля.

Основна відмінність розробленої системи полягає у можливості її самодіагностики, яка базується на формуванні навколо мікросенсора тестового магнітного поля відомої величини. Вимірюючи компоненту холлівської напруги, зумовлену тестовим магнітним полем, знаходять функцію перетворення вимірювального кола. Тестове магнітне поле формується мініатюрним соленоїдом, в полі якої знаходиться мікросенсора. Висока радіаційна стабільність таких магнітометричних пристроїв зумовлюється відсутністю впливу радіації на тестове поле мікросоленоїда. Під час експлуатації в жорстких радіаційних умовах зміна опору мікросоленоїда, виготовленого з мідного дроту, є незрівнянно меншою порівняно з дрейфом параметрів напівпровідникового мікросенсора. Крім того, при живленні мікросоленоїда стабільним струмом, зміна його опору не призводить до зміни значення тестового поля.

Другою відмінністю розробленої системи є підвищена точність вимірювання. Так, при серійних багатократних експериментах з постійними параметрами магнітного поля, які характерні для прискорювачів заряджених частинок, є доцільним вимірювати не лише абсолютне значення індукції поля, але й її невідтворюваність упродовж усієї серії. Підвищення точності вимірювання в таких експериментах забезпечується аналізом сукупності дестабілізуючих факторів і, зокрема, нестабільності температури, рівня електромагнітних завад, часового дрейфу сигналу. Принципово важливим є аналіз закономірності розкиду та дисперсії вимірюваних величин.

В основі інтелектуальних можливостей магнітовимірювальної системи покладено новий алгоритм корекції характеристик перетворення. Алгоритм дозволяє уникнути проблеми формування сильних тестових магнітних полів, є ефективним до як завгодно великих

значень вимірювальних полів і базується на трьох засадах: одночасному аналізі характеристики перетворення по інтегральній та диференційній складових сигналу; частотному рознесенні диференційної та інтегральної складових сигналу; спеціальному методу розрахунків величин функції перетворення та вимірювального магнітного поля.

Частотне рознесення диференційної та інтегральної складових сигналу, що є основоположним у даному алгоритмі, зумовлено необхідністю забезпечення високої точності вимірювання приросту сигналу (диференційної складової) на фоні значного рівня сигналу, сформованого вимірюваним полем (інтегральної складової). Так, при вимірюванні приросту тестового поля в мікросолоноіді індукцією  $\Delta B = 1 \text{ mT}$  та відносній похибці вимірювання  $\delta B = 10^{-3}$  роздільна здатність пристрою повинна бути не гіршою  $\Delta B_{\min} = 1 \text{ }\mu\text{T}$ . Досягнення такої роздільної здатності та відповідної стабільності при вимірюванні магнітних полів у діапазоні до 10 Т передбачає забезпечення динамічного діапазону сигналу у вимірювальному колі не менше ніж 140 дБ. Очевидно, що такі характеристики є практично недосяжними. Рішення проблеми полягає у незалежній обробці диференційної та інтегральної складових сигналу. Найпростішим варіантом такого рознесення є обробка інтегральної складової в тракті постійного струму, а тестового – в частотно-селективному тракті, налаштованого на частоту змінного струму в мікросолоноіді. В кожному з трактів забезпечується динамічний діапазон 70–80 дБ, що дозволяє отримати відношення значення максимального вимірюваного поля  $B_{\max}$  до роздільної здатності по тестовому полю  $\Delta B_{\min}$  на рівні 140–160 дБ.

Функція перетворення вимірювального кола подається у вигляді полінома

$$U_{\text{Ho}} = \sum_{j=0}^n a_j \cdot B^j, \quad (6)$$

а алгоритм її корекції базується на обчисленні системи рівнянь

$$\begin{cases} U_{\text{He}}(B_X) = G \cdot U_{\text{Ho}}(B_X); \\ \frac{dU_{\text{He}}(B_X)}{dB} = G \cdot \frac{dU_{\text{Ho}}(B_X)}{dB}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $U_{\text{Ho}}$ ,  $U_{\text{He}}$  – номінальне та вимірне значення холлівської напруги, відповідно,  $B_X$  – значення індукції вимірюваного поля,  $a_j$  – коефіцієнти поліноміального ряду,  $G$  –

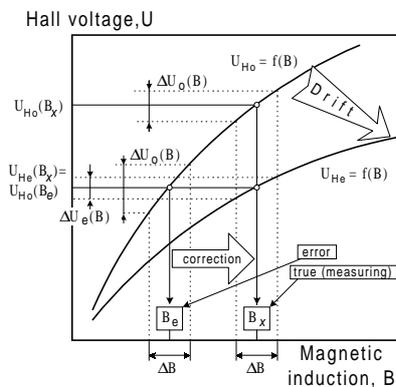


Рис. 20. Алгоритм корекції

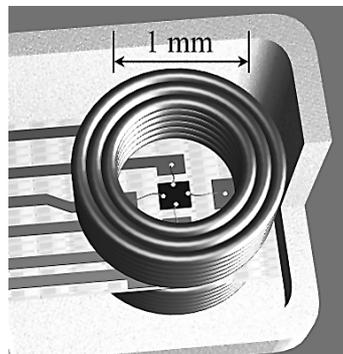


Рис. 21. Структура ФІММП

коефіцієнт дрейфу функції перетворення, який визначається під час тестових вимірювань. Похідні холлівської напруги по індукції магнітного поля  $dU_H/dB$  визначаються в результаті вимірювання диференційного тестового поля котушки підмагнічування (рис. 20).

Під час комплексного аналізу задач створення радіаційно-стійких магнітометричних пристроїв

нами визначена можливість уніфікації рішень проблем таких пристроїв на основі спеціалізованого вузла – функціонально-інтегрованого магнітометричного перетворювача

(ФІММП). ФІММП поєднує основні два елементи перетворення – напівпровідниковий мікросенсор та мікросолоноід, в тестовому полі якого розміщено мікросенсор (рис. 21). ФІММП є базою для реалізації значної кількості функцій вимірювальної системи. Параметри в мікросолоноїда: діаметр котушки = 1 мм, діаметр дроту = 0,05 мм, кількість витків = 500. При струмі 30 мА в мікросолоноїді встановлюється тестове поле  $\Delta B = 5$  мТ.

До складу системи моніторингу входять: базовий блок, комплект зондів на основі ФІММП, вольтметр та персональний комп'ютер, обмін інформацією між якими відбувається по інтерфейсній шині IEEE-488. Базовий блок забезпечує попереднє підсилення сигналів, подавлення завад, комутацію сигналів, формування тестових сигналів тощо.

Система містить три однакові канали вимірювання. Це дає змогу проводити моніторинг магнітного поля в трикоординатному просторі. Крім того, розмістивши ці три канали в одному напрямку, можна суттєво підвищити достовірність результатів вимірювання в тривалих умовах експерименту на прискорювачах заряджених частинок. Це є однією з визначальних функцій інтелектуальних засобів вимірювання.

Алгоритм вимірювання, математична, логічна та статистична обробка результатів забезпечені відповідним програмним забезпеченням.

Створена система моніторингу за своїми функціональними характеристиками відповідає критеріям **інтелектуальних засобів вимірювання**, серед яких: самодіагностика, можливість вибору алгоритму вимірювання та його адаптації до умов експерименту. Точність вимірювання в магнітних полях  $\pm 5$ Т становить краще ніж 0,1 % в умовах опромінення швидкими нейтронами з енергією  $E > 100$  КеВ до флюенсів  $\Phi = 10^{14}$  н· см<sup>-2</sup>. Результати розробки та принцип дії системи демонструвалися на міжнародній конференції “Magnet Technology-17” в Женеві (2001 р.).

**Високопрецизійний градієнтний магнітометр.** Цей магнітовимірювальний пристрій є апаратно-програмним комплексом, який створений в результаті розробки однієї з пріоритетних задач сучасної магнітометрії – вимірювання розподілу магнітного поля в просторово малих об'єктах, і, в першу чергу, у вузьких зазорах сильних магнітів. Характерними особливостями даної задачі є: мінімальні розміри робочих зазорів магнітів (одиниці міліметрів), значні величини магнітних полів (до 4 Т), неоднорідні магнітні поля із складною формою їх розподілу (зумовленою, зокрема, спеціальними конструкціями концентратора та ярма магніту), високі вимоги щодо роздільної здатності та гнучкості засобів вимірювання тощо. Враховуючи, що кожній окремій задачі такого типу притаманний ряд специфічних особливостей, проблема картографування поля у вузьких зазорах магнітів може бути вирішена лише в рамках окремих науково-дослідних проектів.

Проведений аналіз основних підходів та проблем вимірювання магнітних полів показав, що для картографування поля в просторово обмежених об'єктах найоптимальнішим є використання лінійних матриць холлівських сенсорів (сканерів). У цьому випадку повне картографування поля вимагає розроблення декількох різних типів лінійних матриць холлівських сенсорів.

У Лабораторії магнітних сенсорів розроблено та виготовлено пробний варіант апаратно-програмної системи “MultiScan-1” (рис. 22), до складу якої входять комплект зондів, основний блок обробки сигналу, інтерфейсний блок, блок живлення, елементи для монтажу і переміщення зондів, програмне забезпечення.

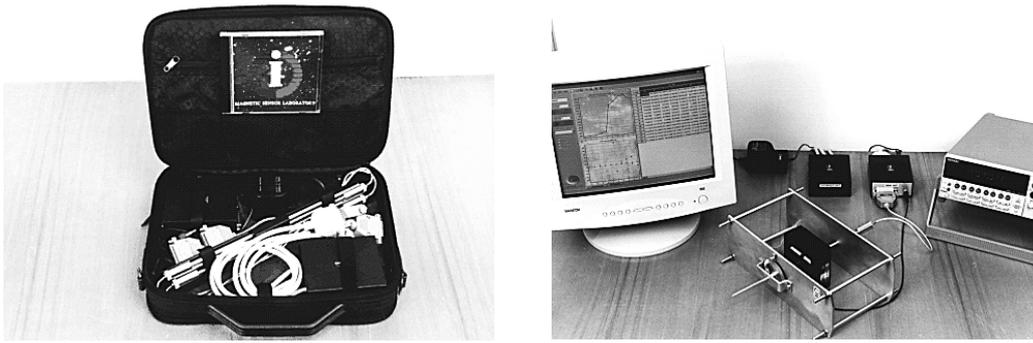


Рис. 22. Зовнішній вигляд градієнтного магнітометра

Для MultiScan-1 використовується стандартний вольтметр, такий, як модель Keithley 2000, персональний IBM-сумісний комп'ютер з операційною системою Windows 9x і наявним LPT портом.

Роздільна здатність градієнтного магнітометра дорівнює 0,001 мТ, невідтворюваність вимірювання при фіксованому просторовому розміщенні зондів не перевищує 0,03 мТ. Приклад результатів дослідження розподілу індукції магнітного поля наведений на рис. 23, а його градієнта – на рис. 24.

Для контролю за роботою системи “MultiScan-1” і візуалізації результатів вимірювання було розроблене програмне забезпечення “MSoft-1”

Виготовлений зразок градієнтного магнітометра був використаний для картографування розподілу магнітного поля в постійному магніті, створеному в Національному інституті радіології Японії. Результати випробувань доповідалися на Міжнародному семінарі “12<sup>th</sup> International Magnet Measurement Workshop (IMMW12)” в Греноблі (2001 р.).

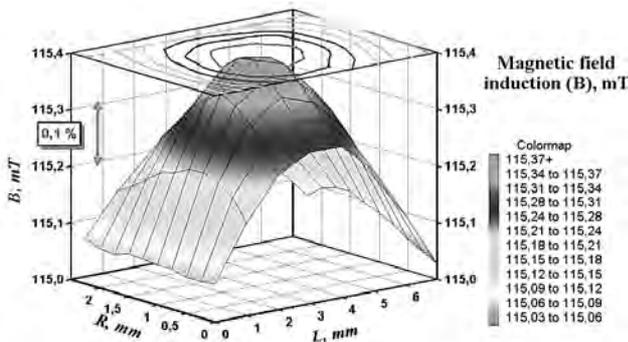


Рис. 23. Приклад вимірювання розподілу індукції магнітного поля

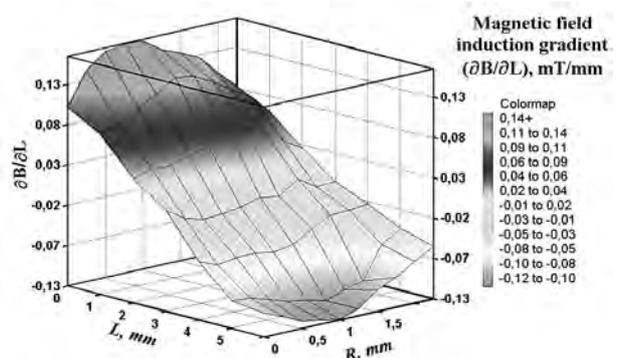


Рис. 24. Приклад вимірювання розподілу градієнта індукції магнітного поля

**Картограф циклотронних магнітів MJU-24.** Постійні магніти для циклотронів розробляються в NIRS (Японія) і призначені використовуватися в медичних цілях для скерування пучка заряджених частинок при лікуванні онкологічних утворень. Вони є складними магнітними системами, де заряджені частинки прискорюються в певних точках траєкторії, в яких магнітне поле різко змінюється за величиною. Тому вони складаються з окремих сегментів, які створюють поле з попеременно сильною та слабкою індукцією. Ці сегменти називаються, відповідно, “вершинами” та “долинами”. Дослідження розподілу магнітного поля в таких системах не може бути вирішено стандартними приладами. По-

перше, тому, що магнітне поле в таких системах характеризується високою неоднорідністю, що є перешкодою у використанні ЯМР-приладів для його вимірювання. По-друге, відстань між полюсами магнітів дуже мала (2–3 мм) для використання стандартних зондів та магнітометрів.

Картограф MJU – 24 призначений для вимірювання просторового розподілу магнітного поля в 21 точці та температури у двох точках простору. До його складу входять: вимірювально-комутаційна плата; високопрецизійний аналого-цифровий перетворювач; пристрій ручного керування; блок живлення. Кількість каналів вимірювання 24, з яких 21 канал – вимірювання магнітного поля, 2 канали – вимірювання температури, 1 канал – самоконтролю та корекції.

Матриця сенсорів магнітного поля та температури, комутатори, схеми обробки аналогового сигналу і цифрових команд об'єднані в єдину вимірювально-комутаційну плату, яка знаходиться безпосередньо в зоні вимірювання магнітного поля. Таке рішення дозволяє використати мінімальну кількість проводів у з'єднувальному кабелі. Для забезпечення високої точності вимірювання сигнал попередньо підсилюється безпосередньо в зоні розміщення матриці сенсорів, а перетворення в цифровий код відбувається за допомогою зовнішнього високоточного аналогово-цифрового перетворювача. Передбачено встановлення 8 можливих коефіцієнтів підсилення (в даному варіанті використовується 4 коефіцієнти підсилення:  $K_V = 1, 10, 100$  та  $1000$ ). Вимірювально-комутаційна плата встановлюється на диск, який обертається.

Пристрій ручного керування служить для індикації вимірювання та в ручному режимі роботи (для відладки та при “грубих” вимірювань без комп'ютера), забезпечує перемикання каналів вимірювання і коефіцієнтів підсилення.

Результати вимірювань розподілу магнітного поля прототипу циклотронного магніту NIRS в 1/3 його натуральної величини проведені в березні 2002 року в Японії, подані на рис. 25. На рисунку добре видно розподіл магнітної індукції у “вершинах” та “долинах” циклотронного магніту. Тепер розробляється новий варіант картографа M3 для дослідження розподілу магнітного поля для циклотронного магніту в натуральну величину.

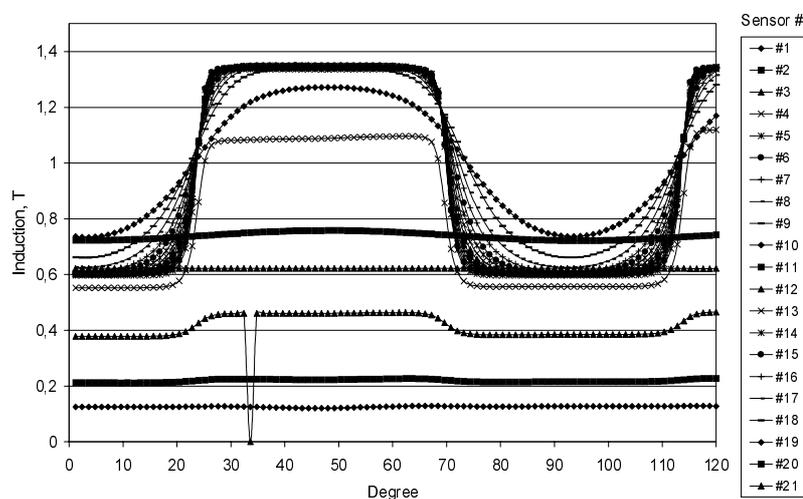


Рис. 25. Розподіл магнітного поля в сегменті макета циклотронного магніту

**Використання магнітних мікросенсорів у космічних апаратах.** Магніточутливі зонди з радіаційностійкими мікросенсорами, виготовленими на основі мікрокристалів InSb, використовуються в магнітних виконавчих органах системи орієнтації та стабілізації космічних апаратів (рис. 27). Вони контролюють магнітний момент магнітних виконавчих органів, інформація про який передається по лініях телеметричного зв'язку, а також можуть

використовуватись як елементи зворотного зв'язку для підвищення точності орієнтації космічного апарату.

Радіаційна стійкість магнітних мікросенсорів є необхідною умовою для використання їх в магнітних виконавчих органах, розташованих в радіаційних умовах відкритого космосу на зовнішній стороні корпусу космічного апарату (рис. 26). Так само, як і можливість мінімізації габаритів, ваги та споживаної потужності.



Рис. 26. Мікросупутник ДКБ “Південне”, Дніпропетровськ

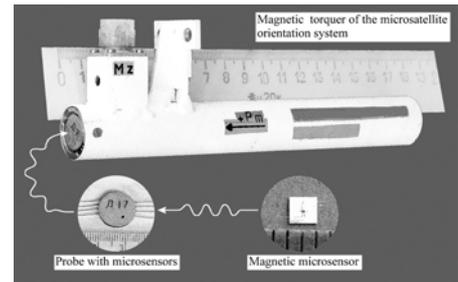
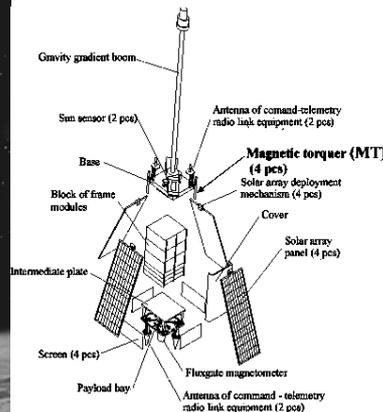


Рис. 27. Магнітний виконавчий орган космічного апарату

У цей час ця робота проводиться в рамках Державної космічної програми України “Мікросупутник” та Міжнародної космічної програми України “Egypsat”, яка розпочалася в 2002 році і закінчиться в 2004 році виготовленням та запуском мікросупутника для Єгипту, в якому на орбіті будуть працювати наші мікросенсори.

### Інші магнітовимірювальні пристрої

Серед інших пристроїв з використанням мікросенсорів магнітного поля слід відмітити розроблені та виготовлені в Лабораторії:

- індикатори залишкової намагніченості металевих деталей для металообробної промисловості;
- портативні магнітометри для магнітних сепараторів підприємства “Продекологія”, м. Рівне;
- диференційні магнітометри для неоднорідних магнітних полів;
- мініатюрні зонди діаметром < 1 мм для безконтактної діагностики надпровідної фази в зразках високотемпературних надпровідників.
- мініатюрні зонди завтовшки 0,1 мм для дослідження параметрів магнітних рідин.

## 8. Висновки

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили створити: технологію вирощування структурно-досконалих мікрокристалів напівпровідників  $A_3B_5$ ; мікросенсори на їх основі, працездатні в екстремальних умовах сильних та неоднорідних магнітних полів, криогенних температур, високих радіаційних навантажень та просторово обмежених

об'ємах магнітних систем; метрологічну базу для дослідження характеристик мікрочисталів та мікросенсорів з високою точністю; магнітовимірювальні пристрої для використання в медичному устаткуванні, прискорювальній техніці високих енергій, в промисловості та космічній техніці.

### 9. Подяка

Роботи виконані при підтримці Міністерства освіти і науки України, Космічного агентства України та Науково-технологічного центру України.

Колектив Лабораторії висловлює подяку за сприяння в роботі керівництву кафедри “Напівпровідникової електроніки” та центру “Кристал”, дирекції Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, ректорату Національного університету “Львівська політехніка”.

1. *Controlled growth of oriented amorphous silicon nanowires via a solid–liquid–solid (SLS) mechanism / D.P.Yu, Y.J.Xing, Q.L.Hang and other // Physica. – 2001. – E 9. – P. 305–309.*

2. *Brudnyi V.N., Grinyew S.N., Stepanov V.E. Physica B. Cond. Matter. – 1995. – 212. – P.429.*

3. *Bolshakova I. Improvement of radiation resistance of magnetic field microsensors. Sensors & Actuators: A. Physical. – 1999. – 76. – P. 152–155.*

4. *Bolshakova I., Koptsev P., Melnyk I., Moskovets M., Krukovsky S., Zayachuk D. Control of parameters of III-V compound microcrystals and epitaxial layers by means of complex doping // Crystal Research and Technology. – 2001. Vol. 36. – № 8–10. – P. 989–997.*

5. *Ивлева В.С., Ольховская Т.И., Слободина Е.Н., Хашимов Ф.Р. / Влияние легирующих примесей на изменение свойств монокристаллов антимонида индия // Электрон. тех. Сер. 6: Материалы. – 1982. – В.2(883). – С. 4.*

6. *Коллин Н.Г., Освенский В.Б., Рытова Н.С., Юрова Е.С. Электрические свойства арсенида индия, облученного быстрыми нейтронами // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 6. – С. 3–8.*