

УДК 539.12.043

І.А. Большакова, Я.Я. Кость, О.Ю. Макідо, А.П. Штабальук, Ф.М. Шуригін
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки,
Лабораторія магнітних сенсорів Науково-дослідного центру "Кристал"

РАДІАЦІЙНА МОДИФІКАЦІЯ ЯК СПОСІБ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ In-ВМІСНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

© Большакова І.А., Кость Я.Я., Макідо О.Ю., Штабальук А.П., Шуригін Ф.М., 2012

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

RADIATION MODIFICATION AS A METHOD OF PARAMETER STABILIZATION FOR In-CONTAINING SEMICONDUCTOR MATERIALS

© Bolshakova I.A., Kost Ya.Ya., Makido O.Yu., Shtabalyuk A.P., Shurygin F.M., 2012

Проаналізовані методи контрольованої зміни параметрів напівпровідникових матеріалів з використанням опромінення високоенергетичними частинками. Визначено, що для контрольованої зміни параметрів напівпровідникових матеріалів групи III-V, зокрема, InSb, перспективним є використання методу радіаційної модифікації. Наведені результати дослідження впливу радіаційної модифікації на стабілізацію параметрів сенсорів магнітного поля на основі гетероструктур InSb/i-GaAs.

Ключові слова: радіаційна модифікація, ядерне легування, антимонід індію, радіаційні дефекти, сенсори магнітного поля.

Methods applied to alter the parameters of semiconductor materials in controlled fashion using high-energy particle irradiation have been analysed. It has been determined that radiation modification is a method promising for the controlled parameter alteration of III-V group semiconductor materials, notably InSb. Results of the study into the effect exerted by radiation modification on the parameter stabilization observed in InSb/i-GaAs heterostructure-based magnetic field sensors are presented.

Key words: radiation modification, nuclear doping, indium antimonide, radiation defects, magnetic field sensors.

Вступ

Сучасні напівпровідникові прилади широко застосовують у різноманітних галузях науки і техніки, таких, як термоядерна та ядерна енергетика, прискорювачі заряджених частинок, космічне та медичне приладобудування. Однак до використання напівпровідникових сенсорів у таких галузях, де присутні радіаційні поля, висувуються вимоги щодо точності та стабільності параметрів цих сенсорів в умовах значних радіаційних навантажень, що своєю чергою вимагає нових підходів та розроблення нових технологій їх стабілізації.

Шлях до розв'язання задачі підвищення якості та надійності напівпровідникових приладів сучасної мікроелектроніки проходить через оптимізацію параметрів напівпровідникових структур та застосування прогресивних технологій під час виготовлення таких структур. Серед відомих методів найпоширеніше металургійне легування напівпровідникових матеріалів ізовалентними та рідкісноземельними домішками [1–2], домішковими комплексами [3], а також домішками з глибокими рівнями [4–5]. Однак ці технології мають деякі недоліки, серед яких можна виділити такі:

1) обмеженість розчинності легуючих домішок у напівпровідниковому матеріалі, що значно звужує діапазон можливих концентрацій носіїв заряду;

2) внесення в матеріал додаткових структурних дефектів. Кількість їх значно збільшується під час зростання концентрації легуючої домішки, що може значно збільшити загальну дефектність сильнолегованих кристалів. Наприклад, легування оловом кристалів GaAs в діапазоні атомних концентрацій від $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ супроводжується додатковою генерацією дефектів, що обумовлюється розпадом пересиченого твердого розчину надлишкового Ga в GaAs. У разі концентрацій олова вище $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ концентрація галієвих вакансій в результаті розпаду твердого розчину Ga в GaAs зростає в п'ять разів [6];

3) недостатня однорідність розподілу легуючих домішок у матеріалі. Це стосується практично всіх методів вирощування напівпровідникових кристалів (методи Чохральського, направленої кристалізації) та гетероепітаксійних структур (газофазна епітаксія, молекулярно-променева епітаксія, MOCVD).

Оскільки підвищення надійності напівпровідникових пристроїв неможливе без забезпечення високої однорідності розподілу домішки в легованих областях, то це накладає обмеження на використання металургійного легування напівпровідникових матеріалів [7–8]. Найістотніше впливає цей недолік при зменшенні розмірів приладів (до мікро- та нанорозмірів).

Методи радіаційної модифікації напівпровідникових матеріалів

Останніми роками для отримання напівпровідникових матеріалів із заданими властивостями широко використовують радіаційні методи: ядерне легування напівпровідника опроміненням тепловими нейтронами [9], зміна властивостей напівпровідникових матеріалів радіаційними дефектами [10], радіаційно-стимульована дифузія [11], іонно-променеве перемішування [12], радіаційно-стимульоване формування хімічних сполук [13] та іонна імплантація (іонне легування) [14]. У таких технологічних процесах широко використовується більшість видів проникаючих випромінювань: швидкі електрони, гама-кванти, нейтрони, протони, альфа-частинки тощо. Застосування опромінення в технологічних процесах базується на радіаційних ефектах, які проявляються в напівпровідниках та напівпровідникових структурах, – ефекти зміщення, іонізуючі ефекти, ядерні перетворення.

Під час перебігу трансмутаційних ядерних реакцій за рахунок теплових нейтронів легуюча домішка утворюється в середині напівпровідникового кристала, а не вводиться у кристал ззовні. При цьому утворені стабільні ізотопи тих самих або сусідніх елементів періодичної системи рівномірно розподілені в усьому об'ємі кристала і виконують у матеріалі функцію електричноактивної домішки (найчастіше донорної). Легуванням напівпровідників за допомогою теплових нейтронів можна здійснити рівномірний розподіл домішки в межах 1–5%, в той час, як хімічне легування дозволяє отримати рівномірність розподілу домішки на порядок гірше – в межах 10–15%.

Наявність в реакторному спектрі швидких нейтронів, які характеризуються високою енергією ($E_n \geq 0,1 \text{ MeV}$), приводить до утворення в матеріалі радіаційних дефектів (РД) і навіть цілих “непорядкованих областей”. Радіаційні дефекти проявляють себе в напівпровідниках як центри рекомбінації, змінюючи час життя неосновних носіїв заряду, а також як центри захоплення, що приводять до зменшення концентрації основних носіїв заряду, та як центри розсіювання, що приводять до зменшення їх рухливості.

Радіаційні дефекти можуть утворювати комплекси як між собою, так і з наявними в матеріалі домішками, що впливає на параметри опроміненого напівпровідникового матеріалу. Відпал радіаційних дефектів є складною технологічною задачею і вимагає розроблення режимів для кожного матеріалу. Експериментальні дослідження показали, що відпал основної маси радіаційних дефектів в опромінених напівпровідниках відбувається в інтервалі температур, що становлять 0,5–0,7 частки від температури плавлення матеріалу [9].

Сьогодні ядерне легування широко використовується для кремнію, германію та арсеніду галію, які найширше застосовуються у виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем

[9,15]. Варто зауважити, що використання радіаційної модифікації для матеріалів Si, Ge та GaAs обмежено через утворення в результаті опромінення великої кількості термостабільних радіаційних дефектів, для зменшення кількості яких матеріал піддають високотемпературному відпалу. Це приводить до зростання питомого опору матеріалу і в результаті ці матеріали під час опромінення високоенергетичними частинками стають високоомними (до 10^9 Ом·см) вже при малих радіаційних навантаженнях, що робить неможливим їх використання в сенсорах, які працюватимуть в сильних радіаційних полях [15].

Проведені раніше дослідження показали перспективність використання в радіаційних полях індій-вмісних напівпровідникових матеріалів $A^{III}B^V$ [3,16]. Сенсори на основі InAs та InSb можуть працювати при високих радіаційних навантаженнях до $\Phi = 10^{18}$ н·см². Отримані результати показали, що для In-вмісних напівпровідників під дією опромінення характерним є як ядерне легування атомами олова в результаті трансмутаційних реакцій In→Sn, так і утворення радіаційних дефектів як донорного, так і акцепторного типу, співвідношення яких в матеріалі залежить від умов опромінення та вихідних параметрів матеріалу. Для стабілізації параметрів сенсорів магнітного поля на основі індій-вмісних напівпровідникових матеріалів (InAs та InSb) перспективним є метод радіаційної модифікації, який полягає в направленій зміні їх властивостей шляхом попереднього опромінення високоенергетичними частинками. Отже, метод радіаційної модифікації передбачає контрольоване комплексне введення в матеріал сенсора як легуючої домішки в результаті перебігу трансмутаційних реакцій, так і радіаційних дефектів різного типу.

Опис та результати експерименту

Для оцінки ефективності технології радіаційної модифікації був проведений експеримент з визначення впливу іонізуючого опромінення на параметри радіаціономодифікованого та стандартного хімічно легуваного сенсорів на основі тонких плівок InSb/i-GaAs.

Радіаційну модифікацію сенсорів на основі InSb проводили в реакторі LVR-15 Інституту плазмової фізики в м. Реж, Чеська республіка (рис. 1) потоком реакторних нейтронів при співвідношенні теплових та швидких нейтронів 8:1. Опромінення проводили за інтенсивності потоку $J = 2,55 \cdot 10^{13}$ н·см⁻²·с⁻¹ до флюенсу $\Phi = 3,2 \cdot 10^{17}$ см² при температурі 60°C. Після опромінення проведено відпал радіаційних дефектів при температурі 200°C протягом 20 хв.

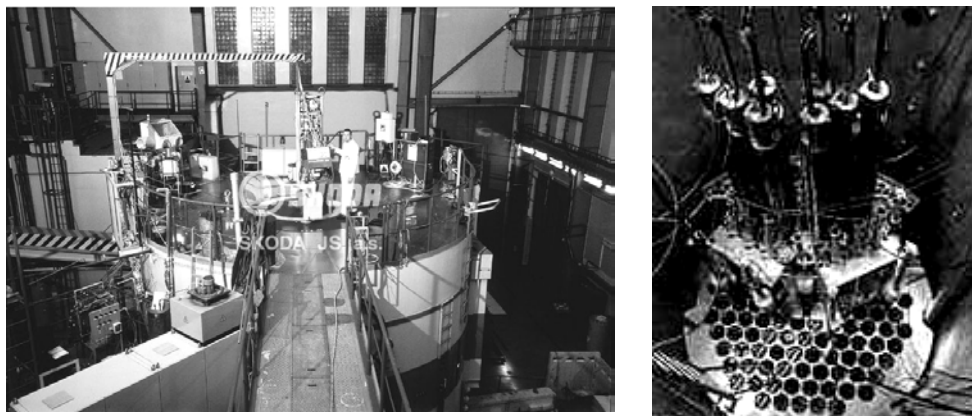


Рис.1. Реактор LVR-15

Зразки радіаційно модифікованих та хімічно легуваних сенсорів InSb були передані для дослідження радіаційної стійкості в реактор ВВР-м Петербурзького інституту ядерної фізики (рис.2). Дослідження зміни параметрів досліджуваних зразків при опроміненні повним спектром реакторних нейтронів проводили із використанням кадмієвого екрана зі співвідношення теплових та швидких нейтронів 1:1. Інтенсивність потоку реакторних нейтронів за таких умов становила $2,4 \cdot 10^{11}$ н·см⁻²·с⁻¹, максимальний флюенс $\Phi = 4 \cdot 10^{17}$ н·см⁻², температура опромінення 110°C.

Експеримент проводили методом on-line досліджень, за якого вимірюють параметри сенсорів у режимі реального часу під час їх опромінення в каналі ядерного реактора. Для цього експерименту використовувалась спеціально розроблена тестова апаратура, яка містить оснащення для розташування досліджуваних сенсорів у каналі реактора, джерело магнітного поля, керуючу електроніку, лінії зв'язку та програмне забезпечення, яке дозволяє отримувати інформацію через мережу Інтернет протягом тривалого часу (до декількох місяців) (рис.3) [17].

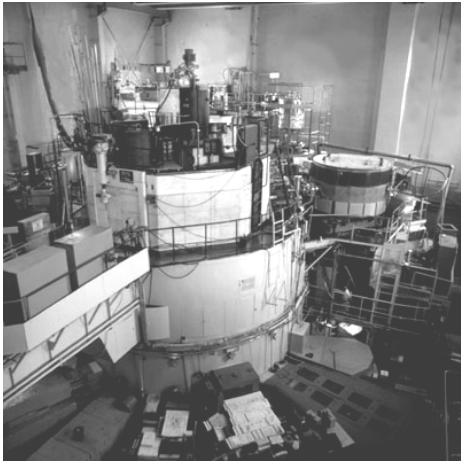


Рис.2. Реактор ВВП-м

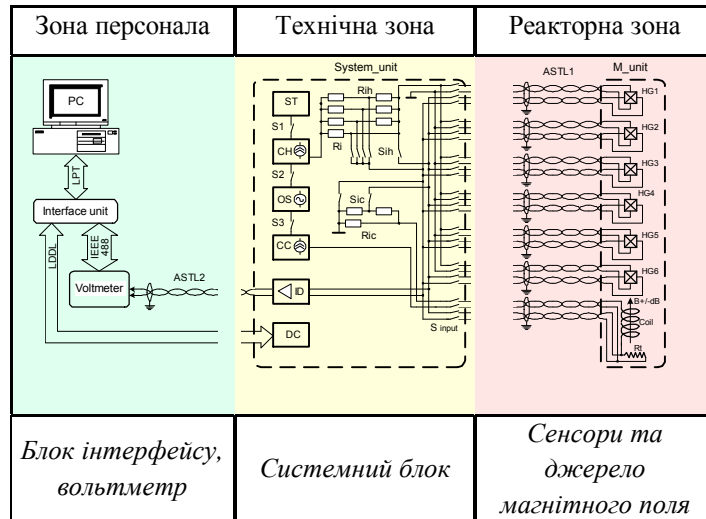


Рис.3. Схема вимірювальної апаратури для on-line досліджень магнітних сенсорів

На рис. 4 наведені результати експерименту з тестування сенсорів на основі тонких плівок InSb, радіаційно модифікованих (крива 1) та хімічно легованих (крива 2).

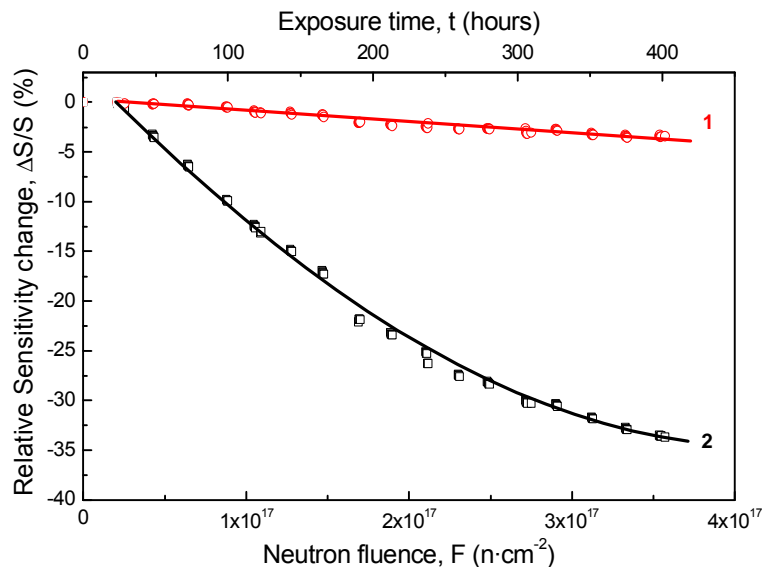


Рис. 4. Відносна зміна чутливості тонкопліткових сенсорів на основі InSb під дією нейтронного опромінення: 1 – радіаційно модифікований сенсор; 2 – хімічно легований сенсор

Як видно з одержаних результатів зміна чутливості радіаційно модифікованого сенсора (крива 1) не перевищувала 5% при максимальному флюенсі. Водночас для хімічно легованого сенсора (крива 2) зміна чутливості досягає 35%. Залежність зміни чутливості від флюенса нейтронів для радіаційно модифікованого сенсора має лінійний характер.

Дрейф чутливості сенсорів, який спостерігається в цьому експерименті, пов'язаний із радіаційними ефектами, що відбуваються в матеріалі сенсора під дією нейтронного опромінення. Під час опромінення реакторними нейтронами в напівпровідниковому матеріалі InSb одночасно відбуваються два взаємокомпенсуючі процеси: (1) генерація радіаційних дефектів переважно акцепторного типу в результаті дії швидких нейтронів та (2) генерація донорних рівнів за рахунок перебігу трансмутаційних реакцій в результаті взаємодії атомів індію з тепловими та резонансними нейтронами з утворенням олова:



Кількість введених атомів олова в матеріалі залежить від параметрів реактора і значення флюенса теплових нейтронів і не залежить від концентрації носіїв заряду у вихідному матеріалі: $N_{\text{Sn}} = a \cdot F_t$ (де a – коефіцієнт легування InSb оловом; F_t – флюенс теплових нейтронів в потоці). Коефіцієнт легування InSb оловом під час нейтронного опромінювання може бути оцінений із виразу $a = s \cdot N_{\text{In}}$, де s (см²) – перетин утворення атомів Sn при нейтронному опромінуванні, N_{In} (см⁻³) – концентрація атомів In в InSb. Співвідношення та кількість утворених радіаційних дефектів донорного та акцепторного типів залежить від вихідних параметрів матеріалу [9, 18].

Радіаційну стійкість сенсора можна оцінити за швидкістю зміни концентрації носіїв заряду в матеріалі сенсора під дією опромінення, яка визначається за рівнянням, що враховує два процеси:

$$Dn / DF \approx a - \beta n, \quad (2)$$

де n – концентрація носіїв заряду в матеріалі опроміненого сенсора, F – флюенс нейтронів, a – коефіцієнт введення донорів за рахунок ядерного легування тепловими нейтронами, β – перетин утворення радіаційних дефектів акцепторного типу швидкими нейтронами.

Для хімічно легovanого сенсора значення швидкості зміни концентрації носіїв заряду в матеріалі становить 0,3 см⁻¹, у той же час для радіаційно модифікованого сенсора ця величина є на порядок меншою – 0,03 см⁻¹, що свідчить про його вищу радіаційну стійкість (значення розраховано на максимальне значення флюенсу нейтронів у цьому експерименті). Експериментально було визначено значення коефіцієнта введення Sn $\alpha = 0,70$ см⁻¹ (коефіцієнт пронормований на один падаючий нейтрон). Тоді за рівнянням (2) для хімічно легovanого сенсора InSb перетин утворення дефектів акцепторного типу становить приблизно $\beta \approx 6 \cdot 10^{-19}$ см², а для радіаційно модифікованого сенсора це значення є вище ($\beta \approx 1,2 \cdot 10^{-18}$ см²). Оскільки для хімічно легovanого сенсора швидкість утворення акцепторних рівнів є незначною, то переважаючим процесом у матеріалі буде утворення донорних рівнів за рахунок ядерного перетворення індію в олово, що приводить до зростання концентрації носіїв заряду матеріалу та зменшення чутливості сенсора. Зростання швидкості утворення акцепторних рівнів під дією швидких нейтронів в радіаційно модифікованому матеріалі сенсора дає можливість практично повністю скомпенсувати появу донорних рівнів під дією теплових та резонансних нейтронів, що і приводить до стабілізації параметрів цього сенсора.

Максимальною радіаційною стійкістю будуть характеризуватись такі сенсори, для матеріалу яких буде виконуватись умова $Dn / DF \rightarrow 0$. Тоді з рівняння (2) отримуємо $a \approx \beta n$. За відомих параметрів α і β цей вираз може бути використаний для оцінки оптимального вихідного рівня легування матеріалу: $n_{\infty} \approx \alpha / \beta$. Для забезпечення максимальної радіаційної стійкості сенсорів на основі n-InSb до дії нейтронного опромінення для цього спектра нейтронного потоку оптимальна концентрація носіїв заряду матеріалу InSb становить $n_{\text{opt}} = (6 \div 7) \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Висновки

Показана можливість використання методу радіаційної модифікації для отримання сенсорів на основі тонких плівок InSb, параметри яких є оптимальними для експлуатації в радіаційних умовах. Шляхом проведення радіаційної модифікації матеріалу тонкопліткових сенсорів InSb були отримані

зразки із параметрами, що забезпечують мінімальну зміну чутливості сенсорів (до 5%) в умовах нейтронного опромінення до флюенсу $\Phi = 4 \cdot 10^{17}$ н·см⁻², що в 7 разів вище за показник хімічно легованих зразків.

Розрахована оптимальна концентрація носіїв заряду для InSb, яка забезпечуватиме максимальну радіаційну стійкість сенсорів до дії нейтронного опромінення для спектра нейтронного потоку із співвідношенням теплових та швидких нейтронів 1:1, який характерний для експериментальних реакторів термоядерного синтезу.

Використання методу радіаційної модифікації для сенсорів на основі тонких плівок InSb дає можливість мінімізувати дрейф їх параметрів до рівня, що піддається корекції електронікою та програмним забезпеченням магнітовимірювальної апаратури.

Наведені результати проведених досліджень показали перспективність використання методу радіаційної модифікації для одержання радіаційностійких напівпровідникових сенсорів на основі напівпровідникової сполуки InSb.

1. Bolshakova I. *Semiconductor sensor materials stable under conditions of hard ionizing radiation* // *Sensors and Actuators: A. Physical.* – 2003. – Vol.106. – P.344–347.
2. Masterov V. F., Zacharenkov L.F. *Rare-earth elements in III–V semiconductors* // *Semiconductors.* – 1990. – Vol. 24, №4. – PP.383–396.
3. Terra F., Большакова И., Голяка Р., Лерой К., Кумада М., Макидо Е., Матковский А., Московец Т. *Получение, исследование и применение легированных микрокристаллов антимонида индия для радиационностойких сенсоров* // *Известия ВУЗов. Физика.* – 2003. – Т.46, №6. – С.67–74.
4. Заитов Ф.А., Горшкова О.В., Поляков А.Я. *К вопросу о поведении хрома в антимониде индия* // *Электронная техника.: Материалы.* – 1983. – в.4 (177) – С.31–34.
5. Мастеров В.Ф. *Глубокие центры в полупроводниках* // *ФТП.* – 1984. – т.18, в.1 – С.3–23.
6. Анастасьева Н.А., Бублик В.Т., Освенский В.Б. и др. *О природе дефектов в монокристаллах арсенида галлия, легированного оловом* // *Кристаллография* – 1978, – Т. 23, вып.2 – с.314–319.
7. В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. *Электроника. М.: Высшая школа, 1991. 622с.*
8. З.Ю. Готра. *Технология микроэлектронных устройств.* – М.: Радио и связь. 1991. – 528 с.
9. Kolin N. *Neutron-Transmutation Doping and Radiation Modification of Semiconductors: Current Status and Outlook* // *Russian Physics Journal.* – 2003. – Vol.45, №6. – PP.543–551.
10. Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский, С.Б. Ластовский, А. Wieckx. *Влияние радиационных дефектов на электрические потери в кремниевых диодах, облученных электронами* // *ФТП* – 2010. – Т.44, №3. – С. 397–401.
11. Степанов В.А. *Радиационно-стимулированная диффузия в твердых телах* // *Журнал технической физики.* – 1998. – Т.68, №8. – с.67–72.
12. Тишковский Е.Г., Ободников В.И., Таскин А.А., Феклистов К.В., Серяпин В.Г. *Перераспределение атомов фосфора, имплантированных в сильно легированный бором кремний* // *ФТП* – 2000. – Т.34, №6. – с.655–659.
13. Качурин Г.А., Черкова С.Г., Марин Д.В., Кеслер В.Г., Скуратов В.А., Черков А.Г. *Влияние состава слоев SiO_x на формирование в них светоизлучающих наноструктур Si под воздействием быстрых тяжелых ионов* // *ФТП* – 2011. – Т.45, №3. – с.419–424.
14. V. A. Kozlov and V. V. Kozlovski. *Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles* // *Semiconductors* – 2001. – Vol.35, № 7. – PP. 735–761.
15. Колин Н.Г., Куликова Л.В., Освенский В.Б., Соловьев С.П., Харченко В.А. *Изменение электрофизических свойств ядерно-легированного арсенида галлия при отжиге* // *ФТП*, – 1984. – Т.18, №12 – с.2187–2192.
16. 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-InSb* // *ФТП.* – 2005. – Т.39, №7. – С.814–819.
17. Bolshakova I., Chekanov V., Leroy C., et al. *Methods and Instrumentation for Investigating Hall Sensors During Their Irradiation in Nuclear Research Reactors* // *IEEE Xplore: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application, 2010, P.1–6.* http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5503722.
18. Брудный В.Н., Большакова И.А., Каменская И.В., Колин Н.Г. *Образование радиационных дефектов в InSb при облучении высокоэнергетическими частицами.* // *Proc. of 12-th. International Conference On Radiation Physics and Chemistry Of Inorganic Materials (RPC-12).* - Tomsk (Russia). – 2003. – P.235–239.