

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Власенко Олександр Володимирович**

УДК 621.793.8;316.8

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ І МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ  
ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ Fe I Ge**

Спеціальність 01.04.07– фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Однорець Лариса Валентинівна**,  
Сумський державний університет,  
професор кафедри електроніки,  
загальної та прикладної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Дехтярук Леонід Васильович**,  
професор кафедри фізики Харківського  
національного університету будівництва та  
архітектури, м. Харків;

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Данильченко Сергій Миколайович**,  
завідувач відділу радіаційної біофізики  
Інституту прикладної фізики НАН України,  
м. Суми.

Захист відбудеться 28 вересня 2021 року о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, Бібліотечний корпус, ауд. БЩ-308.

E-mail: [d55.051.02@sumdu.edu.ua](mailto:d55.051.02@sumdu.edu.ua).

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті інституційного репозитарію СумДУ.

Режим доступу: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/permanent-specialized-council/111-55-051-02.html>.

Автореферат розіслано \_\_\_ серпня 2021 року

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. О. Шкурдода

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток сенсорної електроніки потребує розроблення та впровадження нових функціональних матеріалів на основі металів і напівпровідників, в яких на відміну від магнітних напівпровідникових структур, сформованих уведенням магнітних домішок у напівпровідник, можлива реалізація механізму спин-залежного розсіювання електронів, утворення гранульованих твердих розчинів та бінарних фаз.

Актуальність дослідження властивостей двокомпонентних плівкових систем на основі металів і напівпровідників у вигляді двошарових плівок або одношарових із певним фазовим складом після гомогенізації набуває все більшого поширення, оскільки такі матеріали можуть забезпечувати високу термічну стабільність елементів та їх сумісність з електронними елементами інтегрованих мікросхем (ІМС), що забезпечується близькими значеннями параметрів кристалічних ґраток і дає можливість сформувати гетероструктури – епітаксійні шари з малою густиною дислокацій.

Поглиблене вивчення електрофізичних властивостей таких матеріалів стимульоване можливістю одержання важливої інформації, необхідної для розв'язання окремих важливих проблем фізики твердого тіла. Вивчення взаємного зв'язку між електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями та фазовим складом таких систем пов'язане і з вирішенням питання можливості їх практичного застосування як середовищ для запитування інформації з підвищеною щільністю, високочутливих елементів багатofункціональних сенсорів, магніторезистивної пам'яті.

На сьогодні досить детально вивчені властивості багатoshарових плівкових систем на основі металів. Поряд із цим маловивченими залишаються електрофізичні (питомий опір, термічний коефіцієнт опору – ТКО), магніторезистивні (нормальний магнітоопір – МО, анізотропний магнітоопір – АМО, гігантський магнітоопір – ГМО, стала Холла – СХ) та магнітооптичні (ефект МОКЕ) властивості двокомпонентних плівкових сплавів на основі металів і напівпровідників як перспективних функціональних матеріалів.

Із вищезазначеного випливає доцільність дослідження електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей та ефекту Холла в плівкових системах на основі металу (Fe) і напівпровідника (Ge) в умовах фазоутворення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках: спільного проекту науково-технічного співробітництва «Фазові перетворення, дифузійні процеси і магніторезистивні властивості мультишарів на основі Fe і Pd, Pt або Ag» (2013–2014 рр.) № М/362–2012 від 20.05.2012 р. між СумДУ та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія) (2013–2014 рр.); держбюджетної НДР «Електрофізичні властивості багатокомпонентних плівок на основі Fe і Pd, Ag, Au та Ge» № 0111U006336 (2011–2012 рр.) та державної програми МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах та наукових установах за кордоном»

згідно з договором між Сумським державним університетом та Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина) у 2012 році.

Дисертант брав участь у зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних і заключних звітів.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні взаємозв'язку між фазовим складом та електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями плівок германідів металів нанорозмірної товщини, сформованих методом пошарової конденсації Fe і Ge з подальшою термообробкою.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі наукові завдання:

– проаналізувати вплив температури і товщини шарів (концентрації атомів окремих компонент) на структурно-фазовий стан плівкових матеріалів, сформованих методом пошарової конденсації;

– вивчити температурну і розмірну залежності питомого опору та ТКО плівкових систем на основі Fe і Ge, а також додатково для кращого розуміння фізики процесів, плівок на основі Cu або Cr і Ge;

– дослідити ГМО і АМО та ефект Холла в плівках германідів заліза з точки зору їх практичного застосування як чутливих елементів сенсорної електроніки та інформаційних приладів.

**Об'єкт дослідження** – процеси фазоутворення, електрофізичні, магніторезистивні, магнітооптичні та гальваноманітні властивості плівкових сплавів на основі металу і напівпровідника, сформованих методом пошарової конденсації з подальшою термообробкою.

**Предмет дослідження** – питомий опір, термічний коефіцієнт опору, гігантський і анізотропний магнітоопір та ефект Холла в магнітних плівках германідів заліза Fe<sub>2</sub>Ge, FeGe і FeGe<sub>2</sub>.

**Методи дослідження:** пошарова вакуумна конденсація металів методом термічного випаровування; просвітлювальна електронна мікроскопія (ПЕМ) високої роздільної здатності та електронографія; енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз (ЕДА); високоточна резистометрія для вимірювання ТКО і магнітоопору з використанням автоматизованих систем управління експериментом; вимірювання магнітооптичного ефекту Керра (МОКЕ); рентгенівська спектроскопія.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Проведені в роботі систематичні дослідження взаємозв'язку фазового складу та електрофізичних, магніторезистивних, магнітооптичних і гальваноманітних властивостей функціональних плівкових сплавів на основі Fe і Ge дозволили одержати такі нові наукові результати:

1. Характер температурної залежності питомого опору двошарових плівкових систем Fe/Ge пояснений зміною умов розсіювання електронів як основних носіїв заряду біля межі поділу шарів та екситонним механізмом провідності (формуванням екситонів Ванье – Мотта).

2. Уперше показано, що в плівках германідів заліза, отриманих методом пошарової конденсації з подальшою термообробкою відбувається формування термостабільних (ТКО  $\sim 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>) фаз Fe<sub>2</sub>Ge, FeGe і FeGe<sub>2</sub> в усьому об'ємі

зразка, що приводить до зростання величини МО від 0,02–0,04% у невідпалених системах до 0,30–0,44% – у відпалених до 1070 К зразках.

3. Уперше встановлена залежність магнітооптичних властивостей плівкових сплавів на основі Fe і Ge від фазового складу зразків, яка свідчить про реалізацію двох магнітних станів і швидкодію чутливих елементів у вигляді плівкового сплаву в магнітному полі.

4. Уперше показано, що двокомпонентні плівкові системи на основі Fe і Ge задовольняють основні вимоги до матеріалів омичних контактів ІМС: мають відносно високий питомий опір, лінійну вольт-амперну характеристику і низький ТКО ( $\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) в інтервалі товщин від 20 нм до 150 нм.

**Практичне значення одержаних результатів.** Одержані в процесі експериментальних досліджень результати поглиблюють розуміння взаємного зв'язку процесів фазоутворення і властивостей плівкових систем. Результати досліджень дозволили визначити оптимальну концентрацію компонент та загальну товщину системи для прогнозування термо- і магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів. Результати досліджень фазового складу і магніторезистивних властивостей плівок на основі Fe та Ge дозволили установити умови формування стабільних магнітних фаз германідів заліза, що можуть бути застосовані як елементи багатофункціональних сенсорів й омичні контакти ІМС.

**Особистий внесок здобувача** полягає в самостійному пошуку та аналізуванні літературних джерел, проведенні наукових досліджень. Автор особисто отримував зразки, проводив дослідження структурно-фазового складу, електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей, оброблення та інтерпретацію одержаних результатів. Постановлення задач досліджень і узагальнення результатів виконані разом із науковим керівником д-ром фіз.-мат. наук, проф. Л. В. Однорорець В обговоренні результатів досліджень брали участь проф. С. О. Непийко, проф. І. Ю. Проценко і доц. О. П. Ткач. Автор особисто підготував текст тез доповідей [9–12, 14, 18] та окремі розділи статей [2, 4–7], основні наукові результати доповідав на наукових конференціях і семінарах. Усі наукові положення й висновки, винесені на захист, належать авторові дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та практичні результати роботи були представлені на конференціях і форумах, зокрема: Міжнародних науково-технічних конференціях студентів та молодих учених «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2011, 2013, 2014, 2017, 2020 рр.); Міжнародній конференції «Фізика і технології тонких плівок і наносистем» (м. Івано-Франківськ, 2017 р.); XIII Міжнародній конференції «Electronics and applied physics» (м. Київ, 2017 р.); 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» (м. Одеса, 2016 р.); Міжнародній конференції з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2011, 2014 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Нанотехнології та наноматеріали, NANO-2013» (Буковель, 2013 р.); Міжнародній конференції «Nanomaterials: Applications & Properties» (м. Алушта, 2012 р.); 6-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та

інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 2012 р.); Міжнародній конференції «Clusters and Nanostructured Materials CNM-3'2012» (м. Ужгород, 2012 р.); V Міжнародній науковій конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- і наноструктур» (ФММН-2011) (м. Харків, 2011 р.); XV Міжнародному форумі «Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті» (м. Харків, 2011 р.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 22 наукових працях, серед яких 7 статей, зокрема 5 статей, що обліковуються наукометричною базою Scopus, 2 з яких належать до квартиля Q2 і 4 – до квартиля Q3; 2 статті у фахових виданнях України та 15 тез доповідей.

**Структура і зміст роботи.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 150 найменувань на 16 сторінках. Дисертацію викладено на 140 сторінках, з яких 95 сторінок основного тексту; робота містить 50 рисунків і 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, відзначений зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведена інформація про особистий внесок здобувача, апробацію одержаних результатів, структуру та зміст дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Температурна і польова залежності опору плівкових матеріалів на основі металів і напівпровідників (літературний огляд)» наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження процесів фазоутворення, термо- і магніторезистивних та магнітних властивостей плівкових матеріалів на основі металів і напівпровідників.

*Перший підрозділ* містить узагальнені дані стосовно кристалічної структури і фазоутворення тонких плівок на основі металів і напівпровідників. Підкреслюється, що вивчення фізичних процесів і властивостей таких систем є актуальною задачею фізики твердого тіла. Відзначається, що залежно від температури відпалювання і концентрації атомів Fe в плівкових матеріалах можуть утворюватися магнітні ( $\text{FeGe}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ge}$  і  $\text{FeGe}_2$ ) й немагнітні ( $\text{Fe}_3\text{Ge}$ ,  $\text{Fe}_5\text{Ge}_3$ ,  $\text{Fe}_4\text{Ge}_3$  та  $\text{Fe}_6\text{Ge}_5$ ) рівноважні фази (див., наприклад, працю [1\*] та цитовану в ній літературу).

У *другому підрозділі* систематизовано результати щодо особливостей електричних властивостей (провідність, питомий опір) плівкових сплавів на основі Fe і Ge, отриманих методом магнетронного розпилення з мішеней, за концентрації атомів напівпровідникової компоненти від 30 ат.% до 100 ат.%. Зміна опору в плівках на основі Cr і Ge порівняно з одношаровими металевими плівками може бути пояснена утворенням екситонів Ваньє–Мотта, що можливе лише на інтерфейсі між металом та напівпровідником на відстанях близько 1 нм.

У *третьому підрозділі* розглянуто особливості магніторезистивних і магнітних властивостей та ефекту Холла в плівкових матеріалах на основі

металів і напівпровідників. Відзначається, що магнітоопір у плівкових сплавах і мультишарах за низьких температур має величину 0,1–0,6 %, а стала Холла в плівках на основі металів (Fe, Bi) і напівпровідників (Si, Te) дорівнює  $(0,2–1,6) \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{Кл}$ .

У *четвертому підрозділі* наведені літературні дані стосовно можливості застосування плівок германідів заліза як матеріалів інтегрованої мікроелектроніки (омічні контакти) та сенсорної техніки (чутливі елементи сенсорів магнітного поля).

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи одержання і дослідження мікроструктури, процесів фазоутворення, електрофізичних, магніторезистивних, гальваномагнітних та магнітооптичних властивостей плівкових зразків на основі металів і Ge. У *першому підрозділі* описано обладнання для формування дво- і трикомпонентних плівкових систем на основі Fe, Cu або Cr та Ge або Si методами термічного й електронно-променевого випаровування. Для отримання та термооблення плівкових зразків застосовували надвисоковакуумну установку Інституту фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина) та вакуумну установку ВУП-5М (технологічний вакуум  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па). Швидкість осадження становила 1–5 нм/с, що дало можливість більш точно контролювати товщину зразків ( $d$ ), яку вимірювали двома методами: «in situ» методом кварцового резонатора та методом оптичної інтерферометрії.

*Другий підрозділ* присвячений методиці дослідження фазового складу і мікроструктури двокомпонентних плівкових матеріалів. Електроннографічні та електронно-мікроскопічні дослідження проводили з використанням просвічувального електронного мікроскопа ПЕМ-125К. Для аналізування фазового складу плівок за результатами електроннографічних досліджень ми використали програмне забезпечення в середовищі LabVIEW. Використання скануючого електронного мікроскопу JSM-6400 з детектором аналізу спектра ренгенівського випромінювання DX3000 Detector Power Supply дозволило контролювати наявність домішок у зразках та визначити концентрацію атомів окремих компонент.

У *третьому підрозділі* описано методику дослідження температурної залежності питомого опору та термічного коефіцієнта опору. Термооблення зразків проводили впродовж декількох циклів «нагрівання ↔ охолодження» в автоматизованому режимі, що дозволяє контролювати швидкість нагрівання / охолодження зразків, записувати та обробляти експериментальні дані.

У *четвертому підрозділі* описана методика дослідження магніторезистивних, магнітооптичних властивостей та ефекту Холла. Вимірювання проводили в автоматизованому режимі за допомогою автоматизованого комплексу, що складається з електромагніту, уніполярного блока живлення електромагніту Philips PM 2811, мультиметра для вимірювання опору Keithley2000 Digital, 12-ти бітного АЦП-ЦАП NI USB 6008. Магнітооптичний ефект Керра (MOKE)

досліджували з використанням установки, розміщеної в Інституті фізики університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина). Дослідження магнітних характеристик виконане на вібраційному магнітометрі VSM-7312 (фірма «Lake Shore Cryotronics, Inc.», США), що дало можливість визначити магнітний момент доменів та його кутові залежності в широкому діапазоні полів і температур. Дослідження ефекту Холла в плівкових системах на основі Fe і Ge проводили на автоматизованій системі, розробленій на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики СумДУ за методом ван дер Пау.

У **третьому розділі** «Фазовий склад, електричні та електрофізичні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Ge» наведені результати експериментальних досліджень мікроструктури, процесів фазоутворення та температурної залежності опору і термічного коефіцієнта опору двокомпонентних плівкових матеріалів.

У *першому підрозділі* наведені результати вивчення мікроструктури і процесів фазоутворення у двокомпонентних плівках, сформованих на основі дво- і тришарових зразків. Дослідження фазового складу свідчать про залежність від температур підкладки і відпалювання (рис.1). При конденсації плівок Ge на аморфні підкладки (плівка вуглецю, ситал) вони також мають аморфну структуру, а при конденсації на плівку Fe – квазіаморфну (ка-Ge, відносно низькі температури підкладки) або кристалічну (к-Ge) структуру.

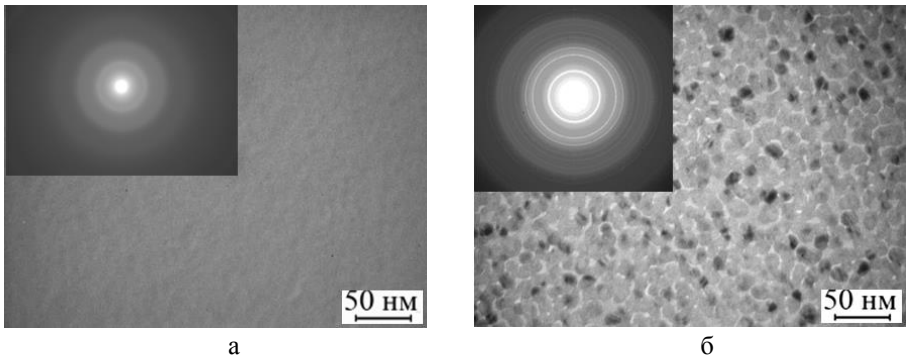


Рисунок 1 – Електронोगрами та відповідні їм мікроструктури одношарових плівок Ge (20 нм)/П після відпалювання до  $T = 520$  К (а) та  $620$  К (б)

Дослідження фазового стану і мікроструктури одношарових плівок Ge як компонент тришарових систем Fe/Ge/Fe свідчать про те, що плівки Ge за відносно низьких температур мають аморфну структуру і за певної температури кристалізуються. Так, наприклад, плівка Ge(20)/П до  $T_b = 520$  К перебуває в аморфному стані (рис.1а); за менших товщин область стабілізації аморфної фази зміщується в бік більших температур. При  $T_b = 570$  К плівка Ge(20)/П кристалізується, але перебуває в дисперсному стані (середній розмір кристалітів  $L_{\text{сер}} \approx 10\text{--}15$  нм); за температури  $T_b = 620$  К плівка має полікристалічну



структуру (рис. 16) із  $L_{\text{сер}} \cong 25$  нм. На електроннограмах від одношарових плівок Ge фіксуються сліди діоксиду германію  $\text{GeO}_2$  у вигляді дуже слабких ліній (102) і (203), у той самий час при відпалюванні плівки  $\text{Fe}(5)/\text{Ge}(25)/\text{Fe}(5)/\Pi$  до  $T_b = 1070$  К ці лінії на електроннограмах відсутні, що свідчить про розпад  $\text{GeO}_2$ .

Додатковим підтвердженням процесів окислення є спостереження муарових візерунків, оскільки  $\text{GeO}_2$  формується не у вигляді окремих кристалітів, а на поверхні вже сформованих. Формування муарових візерунків відбувається у зв'язку з близькими значеннями деяких міжплощинних відстаней  $\alpha\text{-Ge}$  і  $\text{GeO}_2$  (наприклад,  $d_{220}(\alpha\text{-Ge}) \cong 0,2096$  нм і  $d_{200}(\text{GeO}_2) \cong 0,2102$  нм). Плівки Fe незалежно від температури підкладки мають кристалічну структуру.

Залежно від температури термообробки і концентрації атомів заліза в плівкових системах можуть сформуватися магнітні фази  $\text{FeGe}_2$ ,  $\text{FeGe}$  і  $\text{FeGe}_2$ . Проведені дослідження фазового складу і процесів фазоутворення в плівкових системах  $\text{Fe}(10)/\text{Ge}(x)/\text{Fe}(15)/\Pi$ ,  $\text{Fe}(10)/\text{Ge}(x)/\text{Fe}(20)/\Pi$  і  $\text{Fe}(5)/\text{Ge}(x)/\text{Fe}(5)/\Pi$  за  $x = 5 - 40$  нм. Товщина окремих шарів була вибрана таким чином, щоб розглянути варіанти різного співвідношення загальної концентрації атомів окремих компонент, а саме:  $c_{\text{Fe}} < c_{\text{Ge}}$ ;  $c_{\text{Fe}} \cong c_{\text{Ge}}$  і  $c_{\text{Fe}} > c_{\text{Ge}}$ , з метою можливості отримання різних фаз германідів заліза, які можна зафіксувати відповідно до діаграми стану (рис. 2).

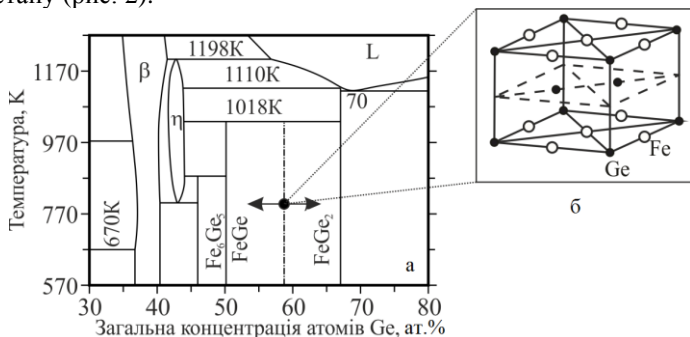


Рисунок 2 – Фрагмент діаграми стану для системи Fe-Ge (а) та елементарна комірка гексагональної решітки фази  $\text{FeGe}_x$  ( $x \cong 1$ ) (б)

На електроннограмах від тришарових систем на основі плівок Fe і Ge, відпалених до температури  $T_b = 870$  К (рис. 3), у випадку  $c_{\text{Fe}} < c_{\text{Ge}}$  фіксуються лінії неупорядкованого твердого розчину атомів Fe в Ge т.р.  $\text{Ge}(\text{Fe})$  із слідами  $\text{GeO}_2$ . Такі плівки мають дрібнодисперсну структуру ( $L_{\text{сер}} \cong 25 - 30$  нм). У тришарових системах, відпалених до 1070 К, на основі т.р.  $\text{Ge}(\text{Fe})$  формуються германіди заліза  $\text{FeGe}_x$ , де  $1 \leq x \leq 2$ . На електроннограмі також фіксується слабка лінія від фази  $\text{FeGe}_2$ . Таким чином, під час відпалювання тришарових систем  $\text{Fe}/\text{Ge}/\text{Fe}/\Pi$  за  $c_{\text{Fe}} < c_{\text{Ge}}$  утворюється т.р.  $\text{Ge}(\text{Fe})$ , на основі якого формуються германіди заліза із середнім розміром кристалітів  $L_{\text{сер}} \cong 15 - 25$  нм.

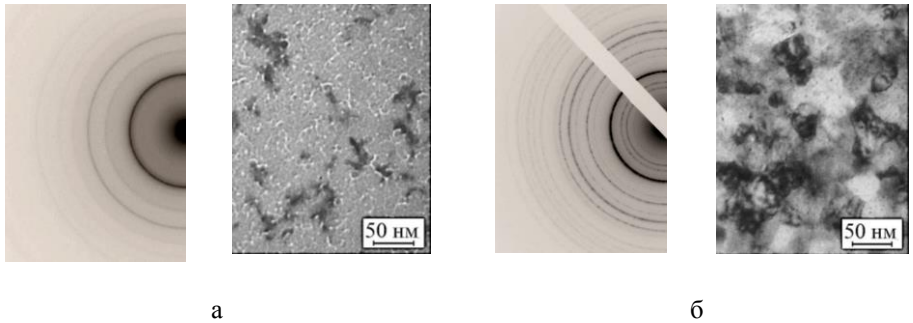


Рисунок 3 – Електроннограми та відповідні їм мікроструктури для невідпаленої (а) і відпаленої до 1070 К (б) тришарової системи Fe(5)/Ge(25)/Fe(5)/П у вихідному стані (фаза германіду  $\text{FeGe}_2$ )

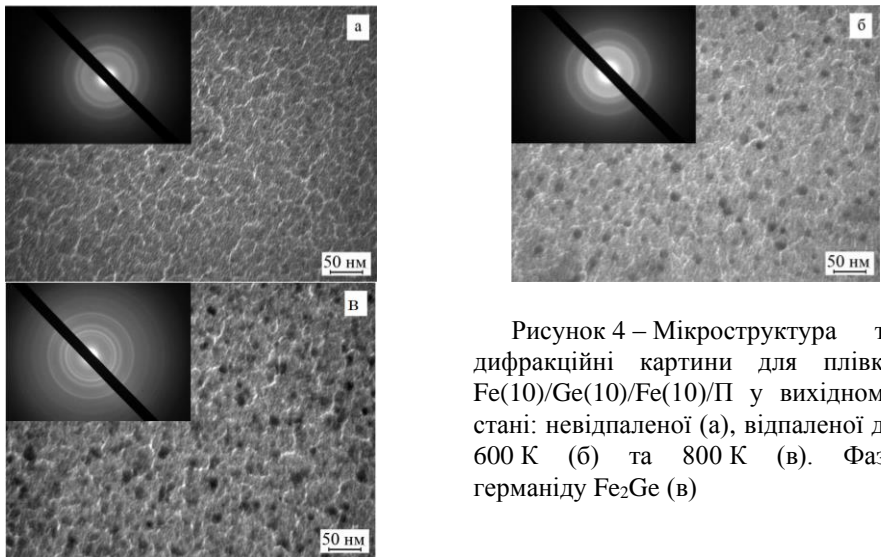


Рисунок 4 – Мікроструктура та дифракційні картини для плівки Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П у вихідному стані: невідпаленої (а), відпаленої до 600 К (б) та 800 К (в). Фаза германіду  $\text{Fe}_2\text{Ge}$  (в)

Таким чином, під час відпалювання тришарових систем Fe/Ge/Fe/П за  $c_{\text{Fe}} < c_{\text{Ge}}$  утворюється т.р. Ge(Fe), на основі якого утворюються германіди заліза із середнім розміром кристалітів  $L_{\text{сер}} \cong 15 - 25$  нм.

Двошарові плівки Ge(20 – 30 нм)/Fe(20 – 30 нм)/П у невідпаленому і відпаленому стані мають кристалічну структуру. У першому випадку формується незначна кількість аморфного  $\text{GeO}_2$  (а- $\text{GeO}_2$ ). На електроннограмах від термовідпалених зразків фіксуються лінії від кристалічного ОЦК-Fe та гексагональної фази FeGe.

У другому підрозділі наведені результати досліджень електрофізичних властивостей плівок германідів заліза. Типові температурні залежності питомого опору  $\rho(T)$  і термічного коефіцієнта опору  $\beta(T)$  для систем на основі Ge і Fe, сформованих на основі двошарових плівок Ge(30 – 40 нм)/Fe(30 – 70 нм)/П, подані на рисунку 5. Їх характерною особливістю є велике значення питомого опору і, відповідно, відносно мале значення ТКО, що можна пояснити утворенням твердих розчинів атомів Ge в шарі Fe – т.р. Fe(Ge).

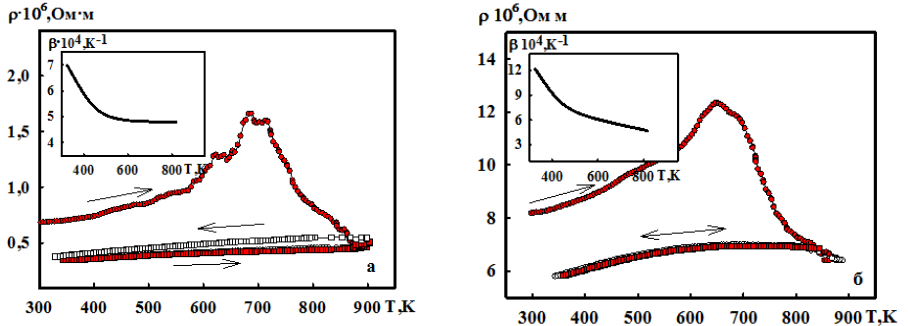


Рисунок 5 – Температурні залежності питомого опору  $\rho(T)$  та ТКО  $\beta(T)$  для плівкових систем Ge(40)/Fe(30)/П (а) і Ge(40)/Fe(70)/П(б) у вихідному стані. Після відпалювання до 870 К – фази FeGe (а) і Fe<sub>2</sub>Ge (б)

Для залежності питомого опору (рис. 5) на першому циклі нагрівання після деякої характеристичної температури  $T_D$  характерне його зменшення, що свідчить про проходження процесів заліковування дефектів, рекристалізації та процесу фазоутворення. Наступні цикли нагрівання – охолодження однакові, що свідчить про стабілізацію електрофізичних властивостей плівкової системи.

Для температурних залежностей питомого опору і ТКО для плівкових систем Fe(10 – 20 нм)/Ge(10 – 20 нм)/Fe(10 – 20 нм)/П (у вихідному стані), відпалених до  $T_b = 800 \text{ K}$ , на першому циклі нагрівання характерна незначна зміна питомого опору в температурному інтервалі 300 – 600 К, що пояснюється відсутністю дефектів, які були вже заліковані при попередньому відпалюванні до 600 К. При температурі від 600 К до 800 К відбувається різке зниження питомого опору, що свідчить про продовження процесів фазоутворення. Наступні цикли нагрівання – охолодження однакові, що вказує на стабілізацію електрофізичних властивостей. Залежності питомого опору та ТКО для плівкової системи Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П (у вихідному стані), відпалених до 600 К та 800 К, наведені на рисунку 6. На температурних залежностях бачимо, що температура переходу плівки з аморфного стану в кристалічний відбувається за температури

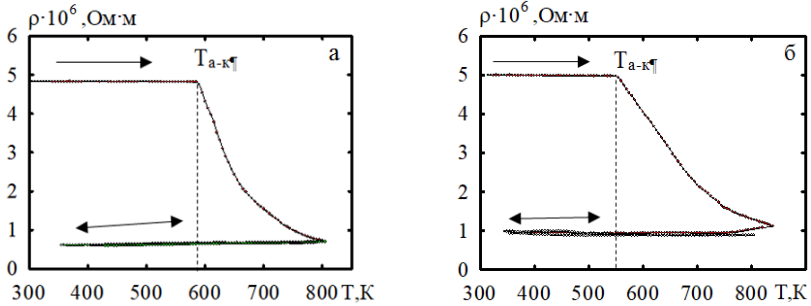


Рисунок 6 – Температурні залежності питомого опору для плівкових систем у вихідному стані Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П (а) і Fe(10)/Ge(30)/Fe(10)/П (б). Після відпалювання – фази Fe<sub>2</sub>Ge (а) і FeGe<sub>2</sub> (б)

$T_{a \rightarrow k} = 560 - 590$  К в залежності від товщини зразка. Для плівок германідів заліза Fe<sub>2</sub>Ge, FeGe і FeGe<sub>2</sub> термічний коефіцієнт опору має величину  $\beta = (3-12) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , що свідчить про високу термічну стабільність зазначених плівкових систем.

У третьому підрозділі розглянутий фізичний механізм провідності, що може мати місце в нанорозмірних плівкових системах на основі металу і напівпровідника, а саме екситонний механізм провідності (див., наприклад, працю [2\*] та цитовану в ній літературу), якщо за певних умов в двошарових плівках утворюються екситони Ваньє – Мотта (В-М) – атомноподібні квазічастинки, що складаються з електрона і дірки, зв'язаних кулонівською взаємодією (рис. 7). У роботі проведено оцінювання внеску екситонів В-М у загальний опір двошарової плівкової системи Fe/Ge/П.

Питомий опір плівки може бути розрахований за співвідношенням [2\*]:

$$\rho' = \frac{\rho_1 \rho_2 (d_1 + d_2)}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1}, \quad (1)$$

$$\text{де } \frac{1}{\rho_1} = \sigma_1 = \frac{n_1 e^2 \lambda_0}{2m^* V}, \quad \frac{1}{\rho_2} = \sigma_2 \cdot (\mu_e + \mu_p),$$

$m^*$  – ефективна маса електрона;

$V$  – середня дрейфова швидкість носіїв електричного струму;

$n_1$  і  $n_2$  – концентрація носіїв заряду в плівках Ge і Fe відповідно;

$\mu_e$  і  $\mu_p$  – рухливість електронів і дірок у плівці Ge відповідно.

Для оцінювання внеску екситонного механізму в загальну провідність плівкової системи Ge/Fe/П плівку розглядали як тришарову, питомий опір якої дорівнює

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho' \rho_2 (d_1 + d_2 + d_2^*)}{\rho_2 \rho_2 d_1 + \rho_1 \rho_2 d_1' + \rho_1 \rho_2 d_1''}. \quad (2)$$

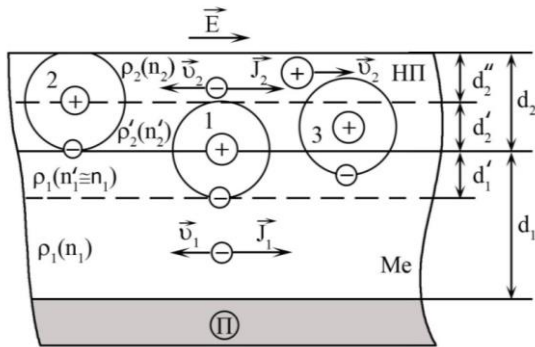


Рисунок 7 – Схема можливого утворення екситонів у плівці Ge/Cr/Π. Адаптовано з праці [2\*]

Розрахунки показують, що для системи Ge/Fe/Π дорівнює  $\rho / \rho' = 1,04$ . Це означає, що збільшення питомого опору системи (тобто  $\rho > \rho'$ ) порівняно з двохшаровою плівкою є результатом утворення екситонів на основі 4 % електронів провідності.

Дослідження терморезистивних властивостей плівок Ge/Fe/Π та додаткові дослідження на прикладі систем Ge/Cu/Π і Ge/Cr/Π вказують на те, що плівки такого типу мають відносно великий питомий опір  $\rho \cong (0,1 - 2,0) \cdot 10^{-6}$  Ом·м і низький ТКО:  $\beta$  (Ge/Fe)  $\cong (5,8 - 6,2) \cdot 10^{-4}$  K<sup>-1</sup>,  $\beta$  (Ge/Cu)  $\cong (-5,6) - (6,8) \cdot 10^{-4}$  K<sup>-1</sup> і  $\beta$  (Ge/Cr)  $\cong (-2,8) - (3,3) \cdot 10^{-5}$  K<sup>-1</sup> в інтервалі товщин  $\Delta d_{Fe} = 20 - 40$  нм;  $\Delta d_{Cr} = 30 - 50$  нм;  $\Delta d_{Cu} = 30 - 80$  нм і  $\Delta d_{Ge} = 20 - 80$  нм, що засвідчує на високу термічну стабільність і відповідає вимогам до матеріалів омичних контактів.

*Четвертий підрозділ* присвячений порівнянню розрахованих на основі одновимірної моделі переходу метал-напівпровідник та експериментальних електричних параметрів германіду заліза FeGe. Порівняння експериментальних і розрахункових величин прямого і зворотного струмів та зворотної напруги дає відхилення між даними від 5,4 % до 9,8 % при зростанні зовнішньої прямої напруги від 0 В до 3 В, що пояснюється неповним урахуванням в одновимірній моделі ефектів поверхневої генерації і рекомбінації носіїв заряду, та рівнем інжекції носіїв у плівковій системі на основі металу і напівпровідника.

У **четвертому розділі** «Гальваномагнітні, магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Ge» наведені результати дослідження ефекту Холла, магніторезистивного ефекту та магнітооптичного ефекту Керра в двокомпонентних плівках на основі Fe і Ge.

Зацікавленість до дослідження властивостей нанорозмірних магнітно-неоднорідних матеріалів не слабшає внаслідок перспектив їх практичного застосування. Багатошарові й багатокомпонентні нанорозмірні плівкові матеріали на основі атомів металів та напівпровідників знаходять застосування

як середовища для запису інформації з підвищеною щільністю, чутливі елементи сенсорів магнітних полів із високою чутливістю, магніторезистивної пам'яті з довільною вибіркою та в системах керування магнітним станом матеріалу впливом зовнішнього магнітного поля. Новий клас функціональних матеріалів – магнітні напівпровідники, мають магнітні властивості за високих температур. До магнітних напівпровідників, крім германідів заліза, відносять також сполуки елементів VI групи (Te, Se) з перехідними металами (Fe, Ni, Ti, V, Mn), в яких переважає іонний зв'язок. Кристалічна решітка Ge, як і германідів заліза, сумісна з кристалічними решітками GaAs і Si-підкладок ІМС.

У першому підрозділі наведені результати вимірювань сталості Холла в плівках на основі Fe і Ge. Установлено, що на характер розмірної і температурної залежностей сталості Холла (СХ) впливають зонна структура (природа) зразка, механізми розсіювання електронів провідності на магнітних моментах і процеси розсіювання, пов'язані із спин-орбітальною взаємодією. Зменшення величини СХ від  $11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$  до  $6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$  при збільшенні температури відпалювання плівкових зразків на основі Fe і Ge можна пояснити процесами фазоутворення в системах (формування магнітних фаз  $\text{Fe}_2\text{Ge}$ ,  $\text{FeGe}$  та  $\text{FeGe}_2$ ).

Оцінювання концентрації носіїв заряду проведено на основі співвідношень

$$R_H = 1/(ne), \text{ та } n = 1/(R_H \cdot e),$$

де  $n$  – концентрація електронів;  $e$  – заряд електрона.

Одержано, що концентрація носіїв заряду у двошарових плівках  $\text{Fe}(20 - 30 \text{ нм})/\text{Ge}(20 - 30 \text{ нм})/\text{П}$  складає  $(2,5 - 4,0) \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  (450 К) і  $(1,8 - 3,2) \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  (570 К).

У другому підрозділі наведені результати досліджень магніторезистивних і магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі Fe і Ge.

Типові польові залежності МО, зокрема ГМО і АМО, дво- і тришарових плівкових систем подані на рисунку 8. Можна відзначити той факт, що за збільшенні товщини шару Ge в плівках  $\text{Ge}(x)/\text{Fe}(10)/\text{П}$  нормальний МО змінюється немономонно і має максимальне значення за  $d_{\text{Ge}} = 7,5 \text{ нм}$ . Швидше за все, поява максимуму пов'язана з утворенням проміжних фаз  $\text{Fe}_x\text{Ge}_{1-x}$  на межі поділу між шарами. На рисунку 8 б – д наведені залежності АМО (б, г) і ГМО (в, д) для тришарових систем із відносно тонкими ( $d_{\text{Fe}} = 5 \text{ нм}$ ) та відносно товстими ( $d_{\text{Fe}} = 20 \text{ нм}$ ) магнітними шарами. Характер польових залежностей (рис. 8 е) за товщин  $d_{\text{Ge}} > 20 \text{ нм}$  свідчить про виникнення ефекту АМО. Максимальні значення ГМО = 0,28–0,40 % (рис. 9 б) спостерігаються за кімнатної температури у відпалених до  $T = 1070 \text{ К}$  системах  $\text{Fe}/\text{Ge}/\text{Fe}/\text{П}$  із товщиною немагнітного шару  $d_{\text{Ge}} = 25\text{--}40 \text{ нм}$  ( $c_{\text{Ge}} = 60\text{--}68 \text{ ат.}\%$ ).

Зростання величини МО, зокрема і ГМО, пояснюється утворенням за певних умов (концентрації і температури) магнітних фаз германідів заліза  $\text{Fe}_2\text{Ge}$ ,  $\text{FeGe}$  та  $\text{FeGe}_2$  в усьому об'ємі зразка.

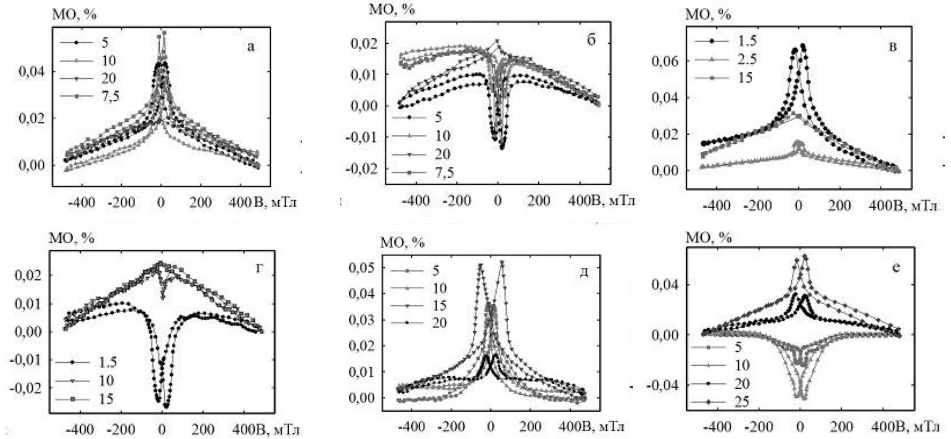


Рисунок 8 – Залежність магнітоопору від напруженості прикладеного зовнішнього магнітного поля при поперечній (а, в, д) та поздовжній (б, г, е) геометрії вимірювання МО для плівкових систем  $\text{Ge}(x)/\text{Fe}(10)/\text{PI}$  (а, б),  $\text{Fe}(5)/\text{Ge}(x)/\text{Fe}(5)/\text{PI}$  (в, г) та  $\text{Fe}(20)/\text{Ge}(x)/\text{Fe}(20)/\text{PI}$  (д, е) у вихідному стані, де  $x$  – товщина в нм зазначена на вставках

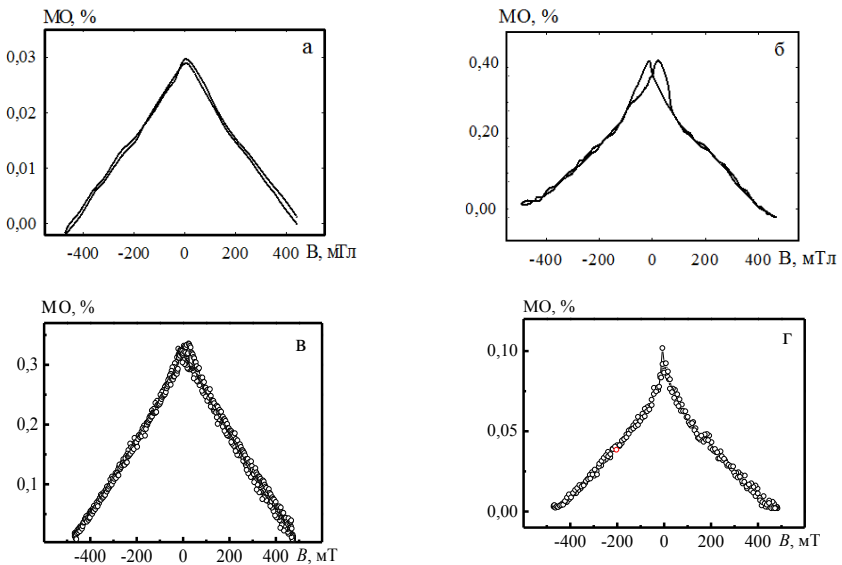


Рисунок 9 – Польові залежності МО для тришарових плівок  $\text{Fe}(5)/\text{Ge}(25)/\text{Fe}(5)/\text{PI}$  (а) і  $\text{Fe}(10)/\text{Ge}(25)/\text{Fe}(10)/\text{PI}$  (в) та плівок германідів заліза, сформованих після відпалювання тришарових плівок до 1070 К,  $\text{Fe}_2\text{Ge}$  (б) і  $\text{FeGe}$  (г) у поперечній (а, в) і повздовжній (б, г) геометріях вимірювання

Результати досліджень магнітооптичних властивостей тришарових плівок Fe/Ge/Fe у вихідному стані (після термообробки германіди FeGe і Fe<sub>2</sub>Ge) вказують на те, що при збільшенні товщини шару Ge від 2,5 нм до 10 нм коерцитивність плівкових систем зменшується від 42 мТл до 15 мТл (невідпалені зразки), від 40 мТл до 20 мТл (відпалені до 600 К) та від 70 мТл до 8 мТл (відпалені до 800 К). Різке зменшення значення коерцитивної сили в зразках, відпалених у температурному інтервалі 300–800 К, пов'язане з процесами фазоутворення (рис. 10).

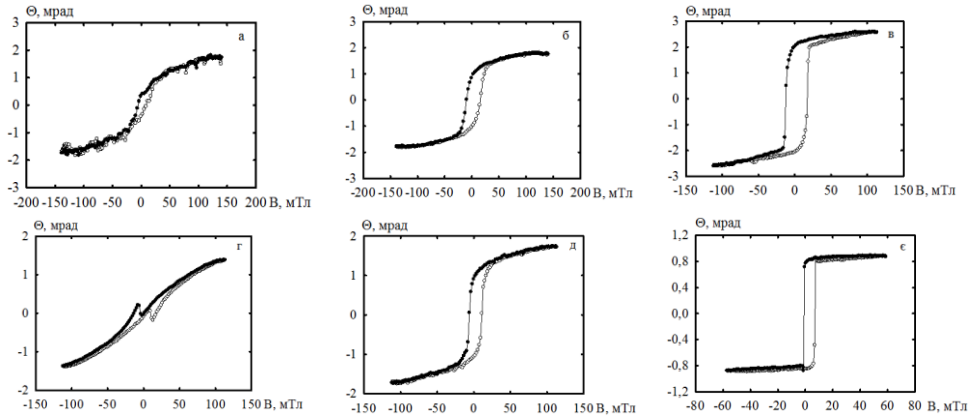


Рисунок 10 – МОКЕ від величини прикладеного магнітного поля для плівок Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П та Fe(10)/Ge(20)/Fe(10)/П у вихідному стані. T<sub>в</sub>, К: 300 (а, г); 600 (б, д) і 800 (в, е)

У *третьому підрозділі* розглянуті властивості плівок нітриду вуглецю CN<sub>x</sub> як матеріалів захисних шарів чутливих елементів сенсорної електроніки.

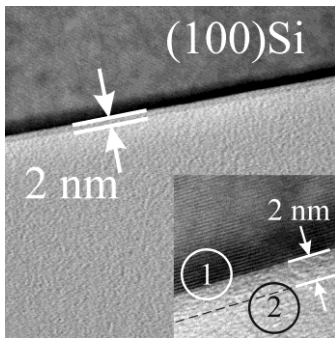


Рисунок 11 – Мікроснімок поперечного перерізу зразка CN<sub>x</sub> товщиною 2 нм, на Si-підкладці

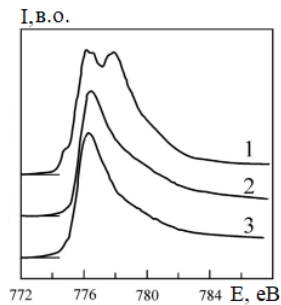


Рисунок 12 – Спектри поглинання рентгенівських променів від краю плівки: для плівки Co (крива 1) без та із захисним шаром а-C (d = 1,5 нм) (крива 2) і CN<sub>x</sub> (d = 1,2 нм) (крива 3)



Тонкі плівки нітридів вуглецю ( $CN_x$ ) мають перспективний промисловий потенціал, оскільки характеризуються хімічною інертністю, низьким коефіцієнтом тертя, високою твердістю та еластичністю.

Для вивчення структури зразків був застосований метод просвічуючої електронної мікроскопії високої роздільної здатності. На рисунку 11 показане мікроскопічне зображення від плівки  $CN_x$  товщиною 2 нм на підкладці Si (100). Зразок був підготовлений таким чином, що можна побачити межі плівки  $CN_x$  і Si (100). На вставці видно площини Si типу (100) з міжплощинною відстанню 0,54 нм. На рисунку 12 як приклад зображений спектр поглинання рентгенівського випромінювання для плівки Co (крива 1) і для тієї ж плівки із захисними покриттями a-C товщиною 1,5 нм (крива 2) і  $CN_x$  товщиною 1,2 нм (крива 3). Крива 1 має два піки, пік при 777,5 eV відповідає краю поглинання Co  $L_3$  і при окисненні - зазнає хімічного зсуву до 779 eV. Криві 2 і 3 мають один пік при 777,5 eV. Таким чином, плівки a-C товщиною 1,5 нм і  $CN_x$  товщиною 1,2 нм ефективно захищають шари, на які вони нанесені, від окислення.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива проблема фізики тонких плівок стосовно фізичних процесів у плівкових сплавах на основі Fe і Ge та їх взаємозв'язку з електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями. Висновки можна сформулювати таким чином.

1. Вивчення процесів фазоутворення в двокомпонентних плівкових системах на основі Fe і Ge, сформованих методом пошарової конденсації з подальшою термообробкою в інтервалі температур 300–900 K, в яких має місце формування плівок германідів заліза  $Fe_2Ge$ ,  $FeGe$  і  $FeGe_2$ , дозволили встановити таке:

– дослідження фазового стану і мікроструктури одношарових плівок Ge як компонент плівкових сплавів свідчать про те, що за відносно низьких температур вони мають аморфну структуру, а за певної температури (580–600 K) кристалізуються. На електроннограмах від одношарових плівок Ge фіксуються сліди діоксиду германію  $GeO_2$  у вигляді дуже слабких ліній (102) і (203), у той самий час після відпалювання плівок до 900 K ці лінії на електроннограмах відсутні, що свідчить про розпад  $GeO_2$ ;

– у плівкових сплавах, сформованих на основі відпалених до 900–1070 K тришарових плівок  $Fe(5\text{--}10\text{ нм})/Ge(2\text{--}25\text{ нм})/Fe(15\text{--}50\text{ нм})$ , в залежності від співвідношення концентрацій атомів окремих компонент утворюються магнітні плівки германідів заліза  $Fe_2Ge$ ,  $FeGe$  і  $FeGe_2$  із розмірами кристалітів 15–30 нм;

– порівняння експериментальних величин питомого опору двошарових плівкових систем  $Ge/Fe/II$  із розрахунковими на основі моделі, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів, свідчать про те, що відмінсть між цими величинами можна пояснити ефектом утворення екситонів Ванье – Мотта на основі 4 % електронів провідності;

– перехід плівки германіду заліза з аморфного стану в кристалічний відбувається за температури  $T_{a \rightarrow k} = 560\text{--}590\text{ K}$  в залежності від товщини зразка; для плівок германідів заліза термічний коефіцієнт опору має величину  $(3\text{--}12) \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ , що говорить про їх високу термічну стабільність.

2. На основі результатів досліджень електрофізичних і магніторезистивних властивостей двокомпонентних плівкових матеріалів на основі Fe і Ge показана можливість їх використання як термостабільних елементів сенсорної електроніки й омичних контактів та встановлене таке:

– дослідження магніторезистивних властивостей плівкових сплавів на основі Fe і Ge в трьох геометріях вимірювання показали, що при збільшенні товщини шару Ge від 10 нм до 15 нм і при підвищенні температури підкладки від 470 K до 520 K спостерігається незначне зростання МО від  $(-0,02)$  до 0,16 %;

– встановлено, що в плівках германідів заліза, отриманих методом пошарової конденсації з подальшою термообробкою від 300 K до 900 K, відбувається формування термостабільних (ТКО  $\sim 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ ) фаз FeGe і FeGe<sub>2</sub> в усьому об'ємі зразка, що приводить до зростання величини МО від 0,02–0,04 % у невідпалених системах до 0,30–0,44 % у відпалених до 1070 K системах.

3. Порівняння експериментальних і розрахункових на основі одновимірної моделі параметрів діода Шоткі свідчить про те, що відхилення між даними від 5,4 % до 9,8 % при зростанні прямої напруги від 0 В до 3 В, можна пояснити тим, що одновимірна модель діода неповністю враховує ефекти поверхневої генерації і рекомбінації носіїв заряду та явище теплоперенесення в плівці.

4. Дослідження магнітооптичних властивостей плівкових систем методом МОКЕ свідчать про їх залежність від фазового складу, що обумовлює зміну коерцитивності та її анізотропію при фазових переходах і залежність величини поля насичення від товщини немагнітного шару. Встановлено, що в системах на основі плівок Fe і Ge спостерігається залежність кута Керра від індукції магнітного поля у вигляді прямокутної петлі гістерезису, що свідчить про реалізацію двох магнітних станів і швидкодію чутливих елементів приладів на основі германідів у магнітному полі.

5. Експериментально встановлено, що величина сталої Холла для одношарових плівок Fe і Ge становить  $(1\text{--}10) \cdot 10^{-10}$  і  $(2\text{--}5) \cdot 10^{-7}\text{ м}^3/\text{Кл}$  відповідно; для двошарових плівок на основі Fe і Ge  $(6\text{--}11) \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$  при зростанні індукції магнітного поля від 0 мТл до 100 мТл. При збільшенні інтервалу термооблення плівкових зразків до 570 K величина сталої Холла зменшується від  $11 \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$  до  $6 \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$ , що можна пояснити процесами фазоутворення в досліджуваних зразках – формуванням магнітних фаз германідів заліза. За результатами розрахунків концентрація носіїв заряду в плівкових сплавах FeGe становить  $2,5 \cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$  (450 K) і  $1,8 \cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$  (570 K), що на порядок менше, ніж в одношарових плівках заліза. Це можна пояснити екситонним механізмом провідності в системах «метал/напівпровідник».

6. Досліджені властивості тонких плівок нітриду вуглецю як захисних покриттів для плівкових чутливих елементів. Показано, що щільність плівки

зменшується і зменшенням температури підкладки та збільшенням товщини плівки. У плівках  $CN_x/Si(100)$  як модельних покриттях показано, що найбільша концентрація алмазоподібної структури спостерігається в області підкладки, при товщинах  $d \geq 2$  нм плівка однорідна з постійною щільністю, що говорить про відповідність плівок  $CN_x$  вимогам до захисних шарів, які можуть бути застосовані як захисні термічно стійкі шари для чутливих елементів сенсорної електроніки на основі германідів та силіцидів металів.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1\*. Room temperature ferromagnetic, anisotropic, germanium rich FeGe(001) alloys / Lungu G. A., Apostol N.G., Stoflea L.E., Costescu R. M., Popescu D.G., Teodorescu C.M. // *Materials* (Basel). – 2013. – Vol. 6(2). – P. 612–625.

2\*. Electrophysical properties of Ge/Cr thin films / M.S. Desai, L.V. Odnodvoretz, C.J. Panchal, I.Yu. Protsenko, N.I. Shumakova, D.V. Velykodnyi // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2011. – Vol. 3, № 1. – P. 232 – 235.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Фазовий склад і терморезистивні властивості плівкових систем на основі Ge/Fe і Ag/Fe / **О.В. Власенко**, О.В. Пилипенко, Л.В. Однодворець // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2012. – Т. 10, № 3. – С. 511–518.

2. Фазовий склад і магніторезистивні властивості тришарових плівок Fe/Ge/Fe / **О.В. Власенко**, Л.В. Однодворець, І.Ю. Проценко // *Металофізика и новейшие технологии*. – 2013. – Т. 35. – С.1639–1647.

3. Магнеторезистивні та магнетооптичні властивості плівкових систем із можливим спін-залежним розсіянням електронів (огляд) / І.Ю. Проценко, І.В. Чешко, Л.В. Однодворець, Д.М. Кондрахова, О.В. Пилипенко, Ю.М. Шабельник, **О.В. Власенко** // *Успехи физ мет.* – 2013. – Т. 14. – С.229 – 255.

4. The phase transformations and magnetoresistive properties of diluted solid solutions based on Fe and Ge atoms / **O.V. Vlasenko**, L.V. Odnodvoretz, N.I. Shumakova // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2014. – V. 6. – P. 02025-1-4.

5. Structure and physical characteristics of ohmic contacts based on Fe and Ge films / **O.V. Vlasenko**, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko // *Problems of atomic science and technology*. – 2014. – V. 4. – P. 130-133.

6. Soft X-ray emission spectroscopy used for the characterization of a-C and  $CN_x$  thin films / S.A. Nepijko, A. Chernenkaya, K. Medjanik, S.V. Chernov, M Klimentov, **O.V. Vlasenko**, S.S. Petrovskaya, L.V. Odnodvoretz, Ya.V. Zaulichnyy, G. Schönhense // *Thin solid films*. – 2015. – V. 577. – P. 109-113.

7. Magnetoresistive and magneto-optical properties of double-component film alloys based on iron / **O.V. Vlasenko**, O.P. Tkach, N.I. Shumakova, L.V. Odnodvoretz // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2018. – V.10, №4. – P.04016-1-4.

## 2. Наукові праці апробаційного характеру

8. Власенко О.В. Магніторезистивні властивості приладових плівкових систем на основі Fe та Ge / **О.В. Власенко**, Ю.С. Удод, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2012». Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ. – 2012. – С. 121.

9. Удод Ю.С. Чутливий елемент датчика магнітного поля на основі плівок Fe і Ge / Ю.С. Удод, **О.В. Власенко**, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2013». Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ. – 2013. – С. 126.

10. Власенко О.В. Фазовий склад і терморезистивні властивості приладових плівкових структур на основі Fe і Ge / **О.В. Власенко**, А.В. Шевченко, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2011». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2011. – С. 105.

11. Власенко О.В. Магнітооптичні властивості приладових структур феромагнетик/напівпровідник / **О.В. Власенко**, Є.В. Стельмах, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2013». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2013. – С. 127.

12. Власенко О.В. Магнітооптичні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Ge як чутливих сенсорних елементів / **О.В. Власенко**, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2017». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2017. – С. 126.

13. Власенко О.В. Електричні властивості матеріалів контактів на основі плівок Fe і Ge / **О.В. Власенко**, О.П. Кошіль, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2014». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2014. – С. 170-171.

14. Власенко О.В. Електричні властивості матеріалів плівкових омичних контактів на основі Fe, Cu, Cr і Ge / **О.В. Власенко**, Н.М. Захарченко, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2017». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2017. – С. 124.

15. Protsenko S.I. The properties of metal/semiconductor films us thermoresistor elements and contact structure / S.I. Protsenko, L.V. Odnodvoret, **O.V. Vlasenko** // 9th International Conference. – Zakopane, Poland. – 2015. – P. 130 – 133.

16. Власенко О.В. Властивості плівок германідів заліза як елементів сенсорної електроніки / **О.В. Власенко**, О.О. Подопрігора, Л.В. Однодворець // «ФЕЕ-2020». Матеріали та програма науково-технічної конференції.– Суми: СумДУ. – 2020. – С. 106.

17. Власенко О.В. Електрофізичні і магніторезистивні властивості наноструктурованих плівкових матеріалів / **О.В. Власенко**, Д.М. Кондрахова, Л.В. Однодворець, О.В. Пилипенко, І.Ю. Проценко, О.П. Ткач, Ю.М. Шабельник //V Міжнародна конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур». – Харків: ХНУ. – 2011. – С. 304-309.

18. Vlasenko O.V. Coercivity of film materials based on Fe and Ge / **O.V. Vlasenko**, N.M. Zakharchenko, L.V. Odnodvoret // «International Conference

on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems» – Ivano-Frankivsk: PrNU. – 2017. – P. 132.

19. Власенко О.В. Фазовий склад, магніторезистивні та електрофізичні властивості плівкових систем на основі Co і Ag та Fe і Ge / **О.В. Власенко**, З.М. Макуха, Ю.М. Шабельник, Л.В. Одродворець, І.Ю. Проценко // Тези доповідей 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – С. 323-324

20. Kondrakhova D.M. Magneto-resistive and magneto-optical properties of nanoscale thin film systems / D.M. Kondrakhova, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko, Yu.M. Shabelnyk, **O.V. Vlasenko** // International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2013). – Bukovel. – 2013. – P. 124.

21. Electrophysical, magnetoresistivity and magneto-optical properties of multilayer materials based on nanocrystalline and amorphous films / S. Nepijko, L.V. Odnodvoretz, O.V. Pylypenko, A.I. Saltykova, O.P. Tkach, **O.V. Vlasenko** // International Conference «Nanomaterials: Application and Properties, NAP-2012». – 2012. – V.1. – P. 01001-1-4.

22. Великодний Д.В. Автоматизовані системи для дослідження електрофізичних властивостей плівкових матеріалів / Д.В. Великодний, **О.В. Власенко**, О.В. Пилипенко, К.В. Тищенко // Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2011». – Ужгород. – 2011. – С. 153.

## АНОТАЦІЯ

**Власенко О. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових сплавів на основі Fe і Ge. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню електрофізичних, магніторезистивних, магнітооптичних властивостей та ефекту Холла в плівкових системах на основі металу (Fe) і напівпровідника (Ge) в умовах фазоутворення. У плівкових сплавах, сформованих на основі відпалених до 900–1070 К тришарових плівок Fe(5–10 нм)/Ge(2–25 нм)/Fe(15–50 нм), в залежності від співвідношення концентрацій атомів окремих компонент утворюються магнітні плівки германідів заліза Fe<sub>2</sub>Ge, FeGe і FeGe<sub>2</sub> із середніми розмірами кристалітів 15–30 нм. Порівняння експериментальних величин питомого опору двошарових плівкових систем Ge/Fe/Π із розрахунковими на основі моделі, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів, свідчать про те, що відміну між цими величинами можна пояснити ефектом утворення екситонів Ваньє–Мотта на основі 4 % електронів провідності.

Перехід плівки германіду заліза із аморфного стану в кристалічний відбувається при температурах  $T_{a \rightarrow k} = 560\text{--}590\text{ K}$  в залежності від товщини плівки. Формування термостабільних (ТКО  $\sim 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ ) фаз  $\text{FeGe}$  і  $\text{FeGe}_2$  по всьому об'єму зразка приводить до зростання величини МО від 0,02–0,04% у невідпалених системах до 0,30–0,44% у відпалених до 900 K зразках. Установлено, що у системах на основі плівок Fe і Ge, спостерігається залежність кута Керра від індукції магнітного поля у вигляді прямокутної петлі гістерезису, що свідчить про реалізацію двох магнітних станів і швидкодію чутливих елементів приладів у магнітному полі. Експериментально встановлено, що величина сталої Холла для двошарових плівок на основі Fe і Ge  $(6\text{--}11) \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$  при зростанні індукції магнітного поля від 0 мТл до 100 мТл. При збільшенні інтервалу термообробки плівкових зразків до 570 K стала Холла зменшується від  $11 \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$  до  $6 \cdot 10^{-9}\text{ м}^3/\text{Кл}$ . Досліджені властивості тонких плівок нітриду вуглецю як захисних покриттів для плівкових чутливих елементів на основі германідів металів.

**Ключові слова:** плівковий сплав, германід металу, пошарова конденсація, термічний коефіцієнт опору, магнітоопір, ефект Керра, стала Холла.

## АННОТАЦИЯ

**Власенко А. В. Электрофизические и магниторезистивные свойства пленочных сплавов на основе Fe и Ge. – Рукопис.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2021.

Диссертация посвящена исследованию электрофизических, магниторезистивных, магнитооптических свойств и эффекта Холла в пленочных системах на основе металла (Fe) и полупроводника (Ge) при фазообразовании.

Изучение процессов фазообразования в двухкомпонентных пленочных материалах на основе Fe и Ge, сформированных методом послойной конденсации с последующей термообработкой в интервале температур 300–1070 K, позволили установить, что в пленочных сплавах, сформированных на основе отожженных до 900–1070 K трехслойных пленок Fe (5–10 нм)/Ge (2–25 нм)/Fe (15–50 нм), в зависимости от соотношения концентраций атомов отдельных компонент образуются магнитные пленки германидов железа  $\text{Fe}_2\text{Ge}$ ,  $\text{FeGe}$  и  $\text{FeGe}_2$  со средними размерами кристаллитов 15–30 нм.

Сравнение экспериментальных величин удельного сопротивления двухслойных пленочных систем Ge/Fe/Π с расчетными на основе модели, в которой сохраняется индивидуальность отдельных слоёв, свидетельствует о том, что отличие между этими величинами можно объяснить эффектом образования экситонов Ванье–Мотта на основе 4% электронов проводимости. Переход пленки германيدا железа из аморфного состояния в кристаллическое происходит при

температурах  $T_{a \rightarrow k} = 560\text{--}590$  К в зависимости от толщины образца. Формирования термостабильных ( $\text{TKC} \sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) фаз FeGe и FeGe<sub>2</sub> по всему объему образца приводит к росту величины МО от 0,02–0,04 % в неотожжённых системах до 0,30–0,44 % в отожженных до 900 К образцах.

Наблюдается зависимость угла Керра от индукции магнитного поля в виде прямоугольной петли гистерезиса, что свидетельствует о реализации двух магнитных состояний и быстродействии чувствительных элементов устройств в магнитном поле.

Получено, что постоянная Холла для двухслойных пленок на основе Fe и Ge имеет величину  $(6\text{--}11) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$  при росте индукции магнитного поля от 0 до 100 мТл. При увеличении интервала термообработки пленочных образцов до 570 К постоянная Холла уменьшается от  $11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$  до  $6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Исследованы свойства тонких пленок углерода и нитрида углерода как защитных покрытий для пленочных чувствительных элементов.

Показано, что плотность пленки  $\text{CN}_x/\text{Si}$  (100) уменьшается при снижении температуры подложки и увеличении толщины образца, а максимальная концентрация атомов алмазоподобной структуры наблюдается в области подложки, а при толщине  $d \geq 2$  нм. Пленка однородная с постоянной плотностью, что свидетельствует о соответствии пленок  $\text{CN}_x$  требованиям к покрытиям, которые могут быть использованы как защитные термостойкие слои для чувствительных элементов сенсорной электроники на основе силицидов и германидов металлов.

**Ключевые слова:** пленочный сплав, германид металла, послойная конденсация, термический коэффициент сопротивления, магнитосопротивление, эффект Керра, постоянная Холла.

## ABSTRACT

**Vlasenko O.V. Electrophysical and magnetoresistive properties of film systems on the basis of Fe and Ge. - Manuscript.**

The thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D) on physical and mathematical sciences, speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2021.

The thesis is devoted to systematic research of electrophysical, magnetoresistive, magneto – optical galvanomagnetic properties of film systems on the basis of metal (Fe) and semiconductor (Ge) in the conditions of phase formation.

In film alloys formed based on annealed to 900–1070 K three-layer films Fe(5–10 nm)/Ge(2–25 nm)/Fe(15–50 nm), depending on the ratio of the concentrations of atoms of individual components, magnetic films are formed iron germanides Fe<sub>2</sub>Ge, FeGe and FeGe<sub>2</sub> with average crystallite sizes of 15–30 nm. Comparison of resistivity of two-layer Ge/Fe/S (S-substrate) film systems with calculated ones based on the model, which preserves the individuality of individual layers, indicates that the

difference between these values can be explained by the effect of Vanier-Mott excitons based on 4 % conduction electrons.

The transition of the iron germanide film from the amorphous state to the crystalline state occurs at temperatures  $T_{a \rightarrow c} = 560\text{--}590$  K depending on the film thickness. The formation of thermostable ( $\text{TRC} \sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) phases of FeGe and FeGe<sub>2</sub> over the entire volume of the sample leads to an increase in the value of MR from 0.02–0.04 % in non-annealed systems to 0.30–0.44 % in annealed to 900 K samples. It is established that in systems based on Fe and Ge films, the dependence of the angle  $\Theta$  on the induction of the magnetic field in the form of a "stepped hysteresis loop" is observed, which indicates the realization of two magnetic states and the speed of sensitive elements of functional devices in a magnetic field. It has been experimentally established that the value of the Hall constant for two-layer films based on Fe and Ge  $(6\text{--}11) \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$  with increasing magnetic field induction from 0 mT to 100 mT. When increasing the heat treatment interval of film samples to 570 K, the value of the Hall constant decreases from  $11 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$  to  $6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$ . The properties of thin films of carbon and carbon nitride as protective coatings for film sensitive elements have been studied.

**Key words:** film alloy, metal germanide, layer-by-layer condensation, thermal coefficient of resistance, magnetoresistance, Kerr effect, Hall constant.

Підписано до друку 25.08.2021.

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № \_\_\_\_.

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.