**Звіт про науково-дослідну роботу: „Формування феромагнітних домішкових наноутворень перехідних елементів та фази спінового скла в кубічних і шаруватих кристалах”**

**Мета роботи** - одержання феромагнітно впорядкованих міктомагнетиків кубічних і шаруватих кристалів з фазою спінового скла, придатних для використання у спіновій електроніці.

Терміни виконання наукової роботи: початок І кв. 2013 р.

закінчення IV кв. 2015 р.

**Керівник роботи**: Ковалюк Захар Дмитрович, д.ф.-м.н., ( Email: chimsp@ukrpost.ua)

**Скорочений зміст висновків рецензентів.**

В звіті викладено результати технологічного пошуку і комплексних досліджень нових магнітних матеріалів на основі кубічних (А4В6) і шаруватих (А3В6 ,А25В36) сполук, придатних для застосування в спіновій електроніці. Авторами встановлено, що в твердих розчинах РЬТе, SnТе, GeTе, при певних ступенях легування домішками перехідних металів, феромагнітні нанокластери співіснують з фазою спінового скла. Запропонована модель перебудови електронної структури даних твердих розчинів, легованих перехідними елементами, які утворюють в зонному спектрі даних сполук глибокі і резонансні рівні, здатні стабілізувати рівень Фермі. Встановлено межу розчинності хрому х~0.025 в катіонній підгратці Gе1-xСгxТе та Ge1-x-y СrxЕuуТe. Авторами проведене електрохімічне інтеркалювання шаруватих кристалів А3 В6 та А25В36 домішками перехідних Зd-металів (Ni, Со) в постійному магнітному полі, вивчено вплив градієнтного магнітного поля на межі розділу кристал-електроліт на процес інтеркалювання та досліджено структурні, магнітні і електричні властивості цих сполук. Аналіз експериментальних результатів дозволив отримати інформацію про вплив магнітного поля на процеси локалізації магнітних домішок в шаруватих кристалах та властивості отриманих інтеркапатів. Встановлено, що інтеркалати кобальту сполук GaSe, InSe, In2Se3, ІnТе володіють феромагнітними властивостями при кімнатній температурі. Результати, отримані під час виконання даної НДР, опубліковані в спеціалізованих рейтингових виданнях і є вагомим внеском у розвиток сучасного напівпровідникового матеріалознавства.

**Пропозиції про подальше використання результатів роботи.**

На основі отриманих результатів рекомендовано продовжити експериментальні і теоретичні дослідження нових матеріалів і структур для спінової електроніки на основі сполук А4В6, А3В6 та А25В36  ,з метою покращення характеристик і для вдосконалення існуючих теоретичних моделей. Особливу увагу звернути на можливість застосування даних сполук в терагерцовій області спектра.

Дані про реєстрацію роботи: № 0113U000481

**РЕФЕРАТ**

**Мета роботи** - одержання феромагнітно впорядкованих міктомагнетиків кубічних і шаруватих кристалів з фазою спінового скла, придатних для використання у спіновій електроніці. **Методи дослідження** - рентгенофлуоресцентний аналіз, рентгенівська дифрактометрія, електронна і атомно-силова мікроскопія, статична і динамічна магнітометрія, гальваномагнітні виміри.

**Об’єкти дослідження** - багатокомпонентні тверді розчини кубічних кристалів А4В6 (РЬТе, SnТе, GеТе), легованих домішками Sс, Ті, V, Сг, Мn, Fе, Еu; шаруваті кристали А3В6 (GaSe, ІпSе, Іп2Sз, ІnТе) та А25Вз6 (Вi2Тe3, Ві2Se3), інтеркальовані магнітними домішками (Fе, Со, Ni), Ві93,99Мn6Fe0,01.

Результатом роботи є отримання нових міктомагнетиків на основі А4В6, А3В6 та А25В36 з домішковими наноутвореннями і фазою спінового скла (в легованих А4В6), фізичні властивості яких були докладно вивчені. Запропоновано модель перебудови електронної структури сплавів розведених магнітних напівпровідників на основі А4 В6, що містять глибокі і резонансні домішкові рівні, при зміні ступеня легування і під тиском. Досліджено магнітний порядок і магнітні неоднорідності в твердих розчинах телуридів свинцю, олова і германію, легованих домішками перехідних металів. В них виявлено існування двох магнітних підсистем - феромагнітної і спінового скла. Запропоновано модель поетапного заповнення матричного кристалу атомами домішки, яка дозволяє говорити про три межі її розчинності - в катіонній підгратці, в межах нанокластерів і в об’ємі мікрокластерів сторонніх фаз.

Досліджено кристалічну структуру та фізичні властивості нових нанокомпозитних структур, що складаються з шарів магнітоактивного інтеркалянта та немагнітного напівпровідника. Показано, що впровадження інтеркалянту з матрицю шаруватого кристалу призводить до появи феромагнітного впорядкування. Встановлено, що наявність градієнтного магнітного поля на межі розподілу "кристал-електроліт" викликає локалізацію інтеркалянту, що призводить до збільшення латеральних розмірів отриманих наноутворень та зміни магнітних властивостей вихідних шаруватих кристалів.

**Ключові слова**: ТВЕРДІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ А4В6, ШАРУВАТІ КРИСТАЛИ НА ОСНОВІ А3В6 ТА А25Вз6, ГЛИБОКІ ДОМІШКОВІ РІВНІ, ФЕРОМАГНІТНІ НАНОУТВОРЕННЯ, КЛАСТЕРНЕ СПІНОВЕ СКЛО, МІКТОМАГНЕТИКИ, СПІНТРОНІКА.

**Публікації**

Слинько Є. І. Розчинність Сг в катіонній підгратці Gе1-xСгxТе та Ge1-x-y СrxЕuуТe / Є. І. Слинько, В. Є. Слинько, В. Добровольський, Л. Кіланський, В. Домуховськкй // Вісник Національного університету "Львівська Політехніка", серія "Електроніка". - 2013. - № 764.-С. 74-82.

'

Скипетров E. П. Электронная структура сплавов на основе теллурида свинца, легированных ванадием / Е.П. Скипетров , A.M. Голованов, Е. И. Слинько, В.И. Слинько // Физика низких температур. – 2013.T.39-N1- С. 98-108.

Бахтінов А. П. Самоорганізація магнітних наноструктур на поверхні шарів шаруватих кристалів Іn2Seз, інтеркальоваких кобальтом / А.П. Бахтінов, В. Б. Болездюк, 3. Д. Ковалюк, 3. Р. Кудринський, О.С. Литвин, А. Д./ІІІевчеико // ФІП. - 2013. – Т.11, N 1. - C. 78-90.

Podgomi A, Anomalous Hall Effect in Ge1-x-y PbxMnyTe Composite System 7 A. Podgomi, L. Kilanski, W. Dobrowolski, M. Gorska, V. Domukhovski, B. Brodowska, A. Reszka, B. J. Kowalski, V. E. Slynko, E. I. Slynko // Acta Physica Polonica A. - 2014. - V. 126, No. 5.-P. 1180-1183.

Kilanski L. Magnetic order and magnetic inhomogeneities in SnCrTe-PbCrTe solid solutions / L. Kilanski, M. Szymanski, B. Brodowska, M. Gorska, R. Szymczak, A. Podgomi, A. Avdonin, A. Reszka, B. J. Kowalski, V. Domukhovski, M. Arciszewska, W. Dobrowolski, V. E. Slynko, E. I. Slynko // Acta Physica Polonica A. - 2014. - V. 126, No. 5. - P. 1203-1206.

Боледзюк В. Б. Структура и магнитные свойства слоистых кристаллов InSe, интеркалированных кобальтом / В. Б. Боледзюк, З.Д. Ковалюк, 3. Р. Кудринський, О. С. Литвин, А. Д. Шевченко // ЖТФ. - 2014. - Т. 84, № 10. - С. 44-47.

Боледзюк В. Б. Электрохимические, оптические и магнитные свойства никелевых интеркалатов InSe / В. Б. Боледзюк, 3. Д. Ковалюк, М. Н. Пырля, А. Д. Шевченко // Неорганические материалы. - 2014. - Т. 50, № 10. - С. 1057-1062.

Ковалюк 3. Д. Дослідження електричних властивостей InSe інтеркальованого кобальтом / 3. Д. Ковалюк, В. В. Шевчик, В. Б. Боледзюк, В. В. Нетяга // Журнал нано- та електронної фізики. - 2014 - Т. 6, № 4. - С. 04038(1)-04038(5).

Боледзюк В. Б. Вплив інтеркалювання нікелем на властивості шаруватих кристалів InSe / В. Б. Боледзюк, 3. Д. Ковалюк, 3. Р. Кудринський, Б. В. Кушнір, О. С. Литвин, А. Д. Шевченко // ФІП. - 2014, Т. 12, № 2. - С. 184-189.

Skipetrov Е. Р. The kinetics of the changes in charge carrier concentration with doping, for lead telluride-based alloys with transition metal impurities / E. P. Skipetrov, A. V. Knotko, E. I. Slynko, V. E. Slynko // Low Temperatur ePhysics. - 2015. - V. 41, No. 2. - P. 141-149.

Skipetrov E. P. Galvanomagnetic and Magnetic Properties of Pb1-yScyTe / E. P. Skipetrov, M. M. Markina, К. V. Zakharov, L. A. Skipetrova, A.A. Solovev, A. V. Knotko, E. I. Slynko, V. E. Slynko // Solid State Phenomena. - 2015. - V. 233-234. - P. 97-100.

Kilanski L. Magnetic properties of Gei1x.yPbxMnyTe Cluster-Glass System / L. Kilanski, A. Podgomi, K. Szalowski, M. Gorska, R. Szymczak, A. Reszka, V. Domukhovsky, B. J. Kowalski, B. Brodowska, W. D. Dobrowolski, V. E. Slynko, E. I. Slynko //.Journal of Alloys and Compounds. - 2015. - V. 649. - P. 142-150.

Skipetrov E. P. Galvanomagnetic properties and electronic structure of iron-doped PbTe / E. P. Skipetrov, О. V. Kruleveckaya, L. A. Skipetrova, A.V. Knotko, E. I. Slynko, V. E. Slynko // Journal of Applied Physics. - 2015. - (in press).

Kilanski L. Magnetic and magnetotransport properties of Sni1-x.yCrxEuyTe crystals: the role of magnetic inhomogeneities / L. Kilanski, M. Gorska, R. Szymczak, A. Podgomi, A. Avdonin, A. Reszka, B. J. Kowalski, V. Domukhovsky, W. Dobrowolski, V. E. Slynko, E. I. Slynko // Journal of Alloys and Compounds. - 2016. - V.658. - P. 931-938.

Боледзюк В. Б. Электрохимические, оптические и магнитные свойства интеркалатов NiхGaSe (0<х≤1) / В. Б. Боледзюк, 3. Д. Ковалюк, 3. Р. Кудринский, М. Н. Пырля, Т. Н. Фешак, А. Д. Шевченко // Неорганические материалы. - 2015 - Т. 51, № 11. - С. 1170-1174.

Boledzyuk V. В. Morphology of van der Waals surfaces and magnetic hysteresis in cobalt intercalated InTe / V. B. Boledzyuk, Z. D. Kovalyuk, Z. R. Kudrynskyi, A. D. Shevchenko // Functional Materials. - 2015 - V. 22, № 3 (in press).

Боледзюк В. Б. Структурные характеристики и магнитные свойства монокристаллов А25В36, интеркалированных кобальтом / В. Б. Боледзюк, -3. Д. Ковалюк, 3. Р. Кудринский, А. Д. Шевченко // ЖТФ. - 2015 - Т. 85, № 11. - С. 86-90.

Светлов В. Н. Анизотропия электросопротивления Ві93,99Мn6Fe0,01 / В. Н. Светлов, А. В. Терехов, В. Б. Степанов, А. Л. Соловьев, Е. В. Христенко, О. М. Ивасишин, А. Д. Шевченко, 3. Д. Ковалюк // Физика низких температур. - 2015.