

Список літератури

1. Хижняк В.В. Структура, завдання та напрямки розвитку полігонних вимірювально-обчислювальних комплексів // Наука і оборона. – 1999. – № 1. – С. 59 – 63.

2. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.

3. Седельников Ю.Э. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пособие / Ю.Э. Седельников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2006. – 304 с.

4. Марков Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Н.А. Марков, А.П. Пудовкин. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. – 88 с.

5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / [Составитель Д.Р.Ж. Уайт Джермантаун]. – Мерленд, 1971–1973. – Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи // Сокращ. Пер. с англ. [Под ред. А.И. Сагира]. Послесловие и комментарии А.Д. Князева. – М.: «Сов. радио», 1977. – 352 с.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. А.М. Зубков, Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів.

Обеспечение электромагнитной совместимости средств внешнего траекторного измерения при выполнении специальных работ на научно-исследовательских полигонах

В.А. Чумакевич, И.И. Опанасюк, И.В. Пулеко, А.В. Герасимюк

В статье рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной совместимости средств внешнетраекторных измерений путем частотно-территориального разнеса при проведении специальных работ.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, радиоэлектронная обстановка, частотно-пространственный разнос.

Support of electromagnetic compatibility of external trajectory measuring devices during special works at research test sites

V. Chumakevych, I. Opanasyuk, I. Puleko, O. Gerasymyuk

The article examines issues pertaining to supporting of electromagnetic compatibility of external trajectory measuring devices using frequency spatial diversion during special works.

Keywords: electromagnetic compatibility, radioelectronic devices, radioelectronic situation, frequency spatial diversion.

УДК 623.465.35

Ю.В. Шабатура¹, Б.О. Середюк¹, С.В. Королько¹, В.Л. Фоменко²

¹Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

²Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів

ПЕРСПЕКТИВИ ВІЙСЬКОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ В Ni_xInSe

У статті виконаний аналіз перспектив застосування магніторезистивних структур на основі напівпровідникових кристалів типу Ni_xInSe для надточного вимірювання магнітного поля. Розглянуто можливість застосування сенсорів магнітного поля на основі структури Ni_xInSe для виявлення військової бронетехніки. Проаналізовано поведінку постійної ґратки, питомої намагніченості та магнітної сприйнятливості Ni_xInSe для різних значень x . Знайдено концентрацію Ni , яка призводить до різкого зростання магнітної сприйнятливості та, як наслідок, надвисокої чутливості сенсорної структури до змін магнітного поля. Проведена математична обробка експериментальних даних залежностей значення постійної ґратки C (перпендикулярно до шарів) Ni_xInSe від концентрації інтеркальованого нікелю та магнітної сприйнятливості монокристалів Ni_xInSe у магнітному полі від вмісту нікелю та отримані аналітичні вирази апроксимуючих функцій.

Ключові слова: магніторезистивний ефект, магнітний сенсор, магнітне поле, детонація боєголовки.

Вступ

Постановка проблеми. Магнітне поле за своєю природою дуже складно екранувати. Земля за рахунок обертання навколо власної осі створює магнітне поле (20–60) мікроТесла на своїй поверхні. Військова бронетехніка має в своєму складі десятки тон феромагнітного матеріалу, який, реагуючи на магнітне поле Землі, створює власний магнітний момент, що призводить до виникнення неоднорідності поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, чутливі магнітні сенсори сьогодні використовуються у багатьох технічних системах, зокрема і в сучасних протитанкових ракетах, для ідентифікації центра мішені та зони мінімальної броні. Крім того, носії інформації побудовані на основі магніторезистивних структур, є стійкими до температурних перепадів, іонізуючого та радіаційного випромінювання, тому вони є перспективними для використання в мікропроцесорних системах наведення сучасних боеголовки [1].

Магніторезистивні структури можуть не тільки забезпечувати кулонівську блокаду електричного струму, але і створювати умови для виникнення нових унікальних магнітних властивостей, які послужать основою для нових підходів у технології матеріалів – носіїв інформації. Зокрема, велетенський магніторезистивний ефект в наноструктурах з почерговими напівпровідниковими та металічними прошарками відкриває перспективу докорінної перебудови технології матеріалів – носіїв інформації і створення надвисокоєфективних квантових комп'ютерів.

Магнітні сенсори застосовуються в сучасних керованих протитанкових ракетах типу “Predator”. Магнітний сенсор в системі управління такої ракети є джерелом сигналу для детонації боеголовки. Загальна вага такої ракети разом з системою управління не перевищує 10 кг. Дальність ураження – до 600 м.

Керована протитанкова зброя BILL 2 (Anti-Tank Guided Weapon), розроблена фірмою Saab (Швеція), взята на озброєння арміями Швеції, Австрії та Бразилії. Вона на порядок потужніша від ракет Predator, але запуск вже не можна здійснити “з плеча”. Вага – 20 кг. Дальність ураження – до 2200 м. Ракета має оптичний та магнітний сенсор. Оптичний сенсор виконує функцію далекоміра, а магнітний сенсор визначає зону мінімальної броні. За потребою сенсори можуть бути дезактивовані, тоді детонація може бути в режимі контактної та неконтактної (дистанційної) дії. Сенсори магнітного поля уловлюють, в якій частині танка є найтонша броня, і в той же момент подають сигнал на детонацію. Ця технологія має назву “Overfly Top Attack (OTA) technology” – самонавідний снаряд з ураженням в кормову частину.

Сенсори аномалії магнітного поля також використовуються в системах контролю морських кордонів, оскільки у водному просторі збурення магнітного поля не може мати випадковий характер, а зумовлено появою великих феромагнітних об'єктів,

які рухаються в немагнітному середовищі. Такими сенсорами, зокрема, оснащені гвинтокрили типу “Seahawk” ВПС США, які на висоті 150 м здатні зафіксувати субмарину на глибині до 150 м.

Актуальність досліджень. Магнітні датчики чисельно реєструють ці збурення (аномалії) фонового магнітного поля Землі та сучасні методи цифрової обробки аналогових сигналів дозволяють з доволі високою точністю визначити масу, напрям руху та швидкість вищезазначених об'єктів [2]. За останніх 30 років роль таких датчиків на ринку техніки озброєнь з кожним роком все більше займають магніторезистивні структури.

Магніторезистивні структури – об'єкти, які мають здатність змінювати свої вольт-амперні характеристики в залежності від зміни зовнішнього магнітного поля. Сенсори на основі магніторезистивних структур мають високу чутливість до змін магнітного поля (10^{-15} Тл при температурах рідкого гелію, та 10^{-13} Тл при кімнатних температурах) [3]. Це широко використовується в галузі військових технологій, а саме в системах: навігації, виявлення субмарин, наведення ракет на ціль тощо.

У 70-х роках минулого століття були створені перші прототипи сенсорів магнітного поля, в яких незначні збурення фонового магнітного поля викликали зміну електричного опору на 10%. Враховуючи точність, з якою вже тоді можна було виміряти електричний опір, військова техніка, електронна компонента якої побудована на основі цих структур, засвідчила свою ефективність та була прийнята на озброєння збройними силами низки країн.

У 1988 р. відкрито гігантський магніто-резистивний ефект, за яким встановлено, що в тонкій плівці немагнітного матеріалу (Cr), затиснутого між шарами феромагнетика (Fe), питомий опір при наявності магнітного поля вдвічі менший, ніж його відсутності [4].

Пояснення цього явища базується на квантово-механічній теорії, згідно з якою при магнітному полі спіни електронів провідності магнітного матеріалу мають один напрям. Коли зовнішнього магнітного поля немає, намагніченість сусідніх феромагнітних шарів протилежна внаслідок слабкої анти-феромагнітної взаємодії. У магнітному полі напрям магнітних моментів обох шарів збігається, що призводить до погашення актів розсіювання електронів провідності на вузлах кристалічної ґратки.

У напівпровідникових сполуках Ni_xGaSe експериментально виявлено велетенський магніторезистивний ефект, згідно з яким при прикладанні магнітного поля електричний опір зменшується в 20 разів. Цей ефект за величиною сигналу / фонового шуму в десятки разів перевищує первинний велетенський магніторезистивний ефект, зафіксований в наноструктурах FeCr. Таким чином, створення і дослідження магніторезистивних структур є важливим завданням для розвитку військових технологій.

Мета статті. Дослідити вплив велетенського магніторезистивного ефекту на магнітні сенсори на основі напівпровідникових кристалів, типу InSe, GaSe з домішками Ni. З'ясувати, при яких концентраціях нікелю в структурах кристалів InSe, GaSe буде спостерігатися їх максимальна чутливість до збурень магнітного поля Землі. На підставі раніше отриманих експериментальних даних розробити математичні моделі магнітних властивостей кристала Ni_xInSe .

Виклад основного матеріалу

Досліджуваний зразок шаруватого напівпровідникового кристала InSe інтеркальований Ni не є ідеальним резистором, оскільки по чергово розміщені наночастиці феромагнетика (Ni) та діамагнетика (InSe) створюють розподілену ємність. Тому для дослідження даних структур використовують методику визначення вольт-амперних характеристик за змінним струмом [4]. Структура InSe характерна тим, що її можна розглядати як квазидвошарову. Атоми In-Se формують шари з сильним ковалентним зв'язком, в той час як в міжшаровому просторі діє слабкий вандер-ваальсівський зв'язок. Це зумовлює сильну анізотропію властивостей таких структур.

Введення (інтеркаляція) різноманітних за своїми властивостями чужорідних атомів, зокрема металів перехідної групи заліза, в структуру шаруватого кристала, розширює коло нових сполук з унікальними властивостями. Поява навіть незначної концентрації магнітної домішки в кристалі InSe може суттєво вплинути на електричні, магнітні та оптичні властивості кристала. Гратка, в свою чергу буде впливати на магнітний момент інтеркалянта, що проявляється в аномальних кінетичних та магнітних властивостях таких структур [5].

Так, наприклад, введення елементу 3d-групи заліза в матрицю $TiSe_2$ призводить до утворення ковалентних центрів Ti-M-Ti, у випадку M_xTiSe_2 , (де M-символ атомів металу Ni, Co, Ag) та супроводжується зменшенням постійної ґратки вздовж осі анізотропії [6]. У випадку Ni_xInSe ковалентні центри In-M-In можуть діяти як пастки для вільних носіїв заряду, з одного боку, і як центри деформації ґратки з іншого. Поскільки впровадження атомів металу 3d-групи заліза в матрицю напівпровідникових шаруватих кристалів суттєво впливає на їх властивості, то можна припустити, що намагніченість є вагомим фактором, яким регулюються вищевказані ефекти під дією зовнішнього магнітного поля [5-6].

Рентгеноструктурний і рентгенофазний аналізи зразків Ni_xInSe підтвердили однорідне заповнення InSe нікелем та показали немонотонну залежність параметра кристалічної решітки InSe вздовж осі, перпендикулярній шарам, від концентрації гостьового Ni [5] (рис. 1).

Цей факт потребує пояснення впливу нікелю на магнітні властивості InSe вздовж та перпендикулярно шаром. З цією метою проведено аналіз питомої

намагніченості Ni_xInSe як функції x , а також магнітної сприйнятливості монокристалів Ni_xInSe у магнітному полі $H = 4,5$ кіло-Ерстед. На рис.1 наведена залежність сталої кристалічної ґратки C від концентрації гостьового нікелю. Як видно з рис. 1, ця залежність є немонотонна: в інтервалі $0 < x \leq 0,75$ та при $x = 1,25$ відстань між двома сусідніми шарами InSe зменшується порівняно з

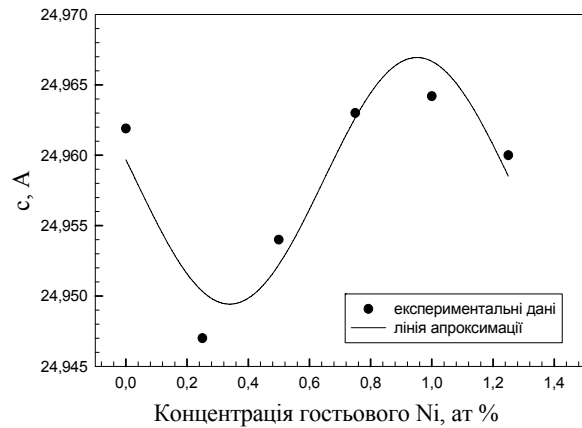


Рис. 1. Залежність значення постійної ґратки C (перпендикулярно до шарів) Ni_xInSe від концентрації інтеркальованого нікелю (точність $\pm 0,0006$ Å) [7]

початковою матрицею (при $x=0$); а при $x=1,0$ цей параметр збільшується. Відмінною рисою результатів, наведених на рис. 1, є нелінійний ріст C , який, зокрема, при $x = 1,0$ відповідає розширенню кристалічної ґратки вихідного кристала.

Іншими словами, в структурі $Ni_{1,0}InSe$ спостерігається розпад ковалентних квазімолекул. При цьому незмінною залишається величина постійної ґратки в площині шарів, що свідчить про сильну анізотропію та істотну різницю хімічного зв'язку в різних кристалографічних напрямках шаруватого кристала InSe. Використовуючи методи математичного моделювання, вищевказані експериментальні дані були апроксимовані наступною функцією

$$c = c_0 + a \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{b} + d\right), \quad (1)$$

де $c_0 = 24,9582$; $a = 0,0088$; $b = 1,2240$; $d = 2,9697$.

Електричні, магнітні та оптичні властивості таких структур теоретично можна описати за допомогою наближення ефективної маси для опису стану електронів, які визначаються ковалентним зв'язком в площинах шарів і слабким вандер-ваальсівським по нормалі до них. На рис. 2 наведена залежність питомої намагніченості a_s Ni_xInSe від концентрації "гостьового" нікелю.

З рис. 2 видно, що питома намагніченість також має немонотонну залежність від концентрації нікелю (x), проте немонотонності залежностей c від x та a_s від x дещо відрізняються. Питома намагніченість однорідного феромагнетика лінійно зростає зі

збільшенням кількості атомів, а на рис. 2 такий характер можна відмітити тільки на ділянках (0,0 – 0,25) та (0,75 – 1,0). Така відсутність феромагнітного відгуку в питомій намагніченості є непрямим підтвердженням відсутності вільного

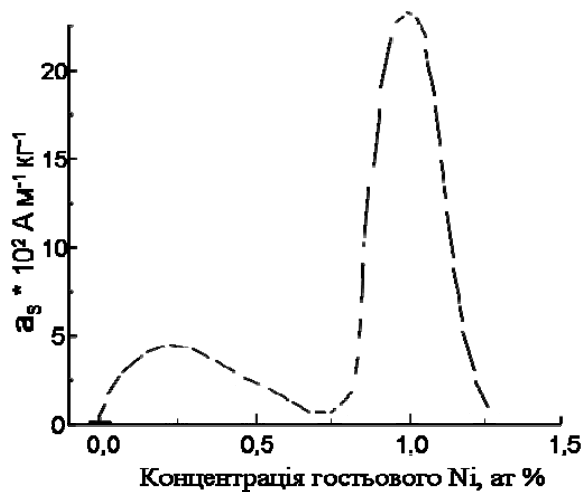


Рис. 2. Залежність питомої намагніченості полікристалів Ni_xInSe від концентрації інтеркальованого нікелю [8]

нікелю в інтеркальованому шаруватому кристалі Ni_xInSe . Критичними значеннями концентрації "гостьового" нікелю є $x = 0,75$ та $x = 1$ ат %. У першому випадку маємо діамagnetизацію зразка, а в другому можемо говорити про прояв нанокластеризації нікелю і його спроможності до когерентного парамагнетування (можливість формування суперпарамагнітного стану). Причиною аномального росту намагніченості при $x=1$ може бути як можливість утворення суперпарамагнітного стану, так і гібридизація електронних орбіталей гостьового нікелю та шарів матриці. На рис. 3 наведена залежність магнітної сприйнятливості кристалів Ni_xInSe у магнітному полі від x .

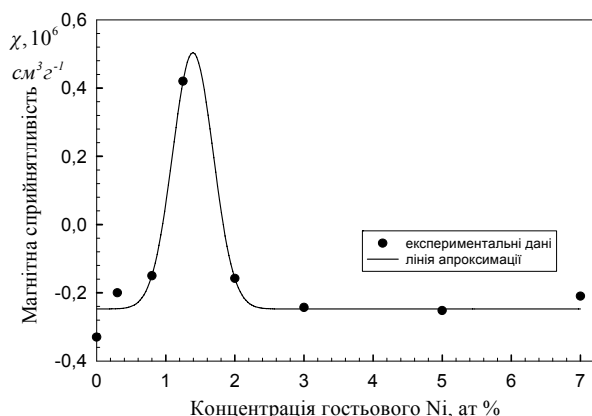


Рис. 3. Залежність магнітної сприйнятливості монокристалів Ni_xInSe у магнітному полі $H = 4,5$ кЕ від вмісту нікелю [9]

Отримані немонотонні залежності як магнітної сприйнятливості, так і намагніченості, добре корелюють з результатами структурних досліджень.

Впровадження нікелю в матрицю моно- чи полікристала $InSe$ зумовлює появу як середнього магнітного моменту, так і намагніченості.

Використовуючи методи математичного моделювання, вищенаведені експериментальні дані були апроксимовані наступною функцією

$$\chi = \chi_0 + a \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \frac{(x-x_0)^2}{b^2}\right), \quad (2)$$

де $\chi_0 = -0,2474$; $a = 0,7512$; $x_0 = 1,3932$; $b = 0,2942$.

Висновки

Знайдено значення x (концентрацію впровадженого Ni), при якому структура Ni_xInSe показує аномально високу намагніченість. Це дозволяє знайти ту кількість (масу) матеріалу нікелю, яку потрібно впровадити в структуру напівпровідникового кристала $InSe$ так, щоб максимізувати коефіцієнт корисної дії сенсорної структури.

Структури з почерговими напівпровідниковими та магнітоактивними прошарками дають принципову можливість керування магнітними властивостями. Ці структури мають різку анізотропію магнітотчливості. Тому якщо закріпити такий сенсор на вісь та обертати його з певною частотою (подібно до радіолокаційних станцій), можна реєструвати швидкості та напрям руху військової бронетехніки.

Досліджувані напівпровідникові кристали з домішками 3d-елементів типу нікель дозволяють розширити функціональні можливості сучасних магнітних сенсорів, призначених для виявлення важкої бронетехніки.

Список літератури

1. Dalichaouch Y., Czipott, P., Perry A. *Magnetic sensors for battlefield applications* / Y. Dalichaouch, P. Czipott, A. Perry // *Proc. SPIE* – 2001. – Vol. 4393. – P. 129–134.
2. Lenz J., Edelstein, A.S. *Magnetic Sensors and Their applications*. / J. Lenz, A.S. Edelstein // *IEEE Sens. J.* – 2006. – № 6. – P. 631–649.
3. Bandyopadhyay S., Cahay M. *Proposal for a spintronic femto-Tesla magnetic field sensor* / S. Bandyopadhyay, M. Cahay // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2005. – № 1-2. – P. 98–103.
4. Phan M.H., Peng H.X. *Giant magnetoelectric materials: Fundamentals and applications* / M.H. Phan, H.X. Peng // *Progress in Materials Science*. – 2008. – Vol. 53. – P. 323–420.
5. Захарченко Б.П. *Інтегрування магнетизму в напівпровідникову електроніку* / Б.П. Захарченко // *УФН*. – 2005. – Т. 175. – №11. – С. 629–675.
6. Тутов А.Н. *Фазові діаграми інтеркалатних матеріалів з поляронним типом локалізації носіїв* / А.Н. Тутов, А.В. Долгошеин // *ФТТ*. – 2000. – Т.42. – №3. – С. 425–427.
7. Дацюк Ю.Р., Фоменко В.Л., Фіяла Я. М., Товстюк Н.К. *Розробка технології отримання інтеркалатів з почерговими напівпровідниковими і магнітоактивними прошарками* /

Ю.Р. Дацюк, В.Л. Фоменко, Я.М. Фіяла, Н.К. Товстюк // Науковий вісник КУЕТУ, Нові технології. – 2008. – № 1 (19). – С. 62–65.

8. Стахира Й.М., Товстюк Н.К., Фоменко В.Л., Григорчак И.И., Борисюк А.К., Середюк Б.А. Структура, намагніченість і низкотемпературний імпедансний отклик полікристаллов InSe, інтеркалірованих нікелем / Й.М. Стахира, Н.К. Товстюк, В.Л. Фоменко, И.И. Григорчак,

А.К. Борисюк, Б.А. Середюк // ФНТ. – 2012. – Т.38. – № 1. – С. 69–75.

9. Стахира Й.М., Товстюк Н.К., Фоменко В.Л., Цмоць В.М., Щупляк А.Н. Структура і магнітні властивості монокристаллов InSe, інтеркалірованих нікелем / Й.М. Стахира, Н.К. Товстюк, В.Л. Фоменко, В.М. Цмоць, А.Н. Щупляк // ФТП. – 2011. – Т.45. – № 10. – С. 1308–1313.

Перспективи воєнного застосування сенсорів магнітного поля на основі магніторезистивного ефекту в Ni_xInSe

Ю. В. Шабатура, Б. О. Середюк, С. В. Королько, В. Л. Фоменко

В статті викладено аналіз перспективи застосування магніторезистивних структур на основі напівпровідникових кристаллов типу Ni_xInSe для високоточного вимірювання магнітного поля. Розглянуто можливість застосування сенсорів магнітного поля на основі структури Ni_xInSe для виявлення військової бронетехніки. Проаналізовано поведінку постійної решітки, удельної намагніченості і магнітної чутливості Ni_xInSe для різних значень x . Знайдено критичну концентрацію Ni , яка призводить до різкого зростання магнітної чутливості і як наслідок, до надзвичайно високої чутливості сенсорної структури до змін магнітного поля. Проведено математичну обробку експериментальних даних залежностей значення постійної решітки C (перпендикулярно до шарів) Ni_xInSe від концентрації інтеркалірованого нікеля і магнітної чутливості монокристаллов Ni_xInSe від вмістимості нікеля і отримано аналітичні функції, апроксимуючі експериментальні дані.

Ключові слова: магніторезистивний ефект, магнітний сенсор, магнітне поле, детонація боеголовки.

Prospects of military applications of magnetic field sensors based on magnetoresistance effect in Ni_xInSe

Yu. Shabatura, B. Serediuk, S. Korolko, V. Fomenko

The applications of magnetoresistance structures based on semiconductor crystals of Ni_xInSe for high precision measurement of the magnetic field are outlined in this article. Possibilities of using magnetic field sensors based on Ni_xInSe structures for detection of the armor military vehicles are discussed. The behaviour of lattice constant, specific magnetization and magnetic susceptibility of Ni_xInSe is analyzed for various x values. The critical concentration of Ni which causes a sharp increase of magnetic susceptibility and the resultant high sensitivity of the sensor structure to the magnetic field disturbances is found. Mathematical analysis of the experimental results was carried out for the dependencies of lattice constant C (perpendicular to the layers) of Ni_xInSe and magnetic susceptibility on the concentration of Ni . Analytical functions which approximate the experimental data are found.

Keywords: magnetoresistance effect, magnetic sensor, magnetic field, warhead detonation.