

УДК 623.465.35

Б.О. Середюк

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ ТИПУ InSe , ЛЕГОВАНИХ МЕТАЛАМИ, З ОГЛЯДУ НА ЇХ ВІЙСЬКОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ

У статті виконаний аналіз перспектив застосування магніторезистивних структур на основі напівпровідникових кристалів типу InSe для прецизійного вимірювання магнітного поля. Розглянуто можливість застосування сенсорів магнітного поля на основі структури InSe для виявлення військової бронетехніки. Досліджено вплив домішок металів на шарувату структуру напівпровідникового матеріалу, як на сильний ковалентний зв'язок всередині шару, так і на слабкий Ван-дер-Ваальсовий зв'язок у міжшаровому просторі. Проаналізовано вольт-амперну характеристику за змінним струмом кристалу In_4Se_3 з домішками хрому, міді та германію при різних температурах від кімнатної до температури рідкого азоту. Обґрунтовано вплив домішки металу та її концентрації на електричні та магнітні властивості напівпровідникових кристалів типу InSe .

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

Вступ

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 у своєму складі десятки тонн феромагнітного матеріалу, який, реагуючи з магнітним полем Землі, створює власний магнітний момент, що призводить до виникнення неоднорідності поля, яке можна зафіксувати за допомогою магніторезистивних структур.

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 стійкі до температурних перепадів, іонізуючого та радіаційного випромінювання, тому є перспективними для використання в мікропроцесорних системах наведення сучасних боєголовок [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, гігантський магніторезистивний ефект в наноструктурах з почерговими напівпровідниковими та металічними прошарками відкриває перспективу докорінної перебудови технології матеріалів – носіїв інформації і створення надвисоко-ефективних 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 боєголовки. 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. При потребі сенсори можуть бути дезактивовані, тоді детонація може бути в режимі контактної дії 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 із 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 і постановка проблеми

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

Магніторезистивні структури – об'єкти, які мають здатність змінювати свої вольт-амперні характеристики в залежності від зміни зовнішнього магнітного поля. Сенсори на основі магніто-резистивних 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 є в два рази менший, ніж при його відсутності [4].

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

У напівпровідникових сполуках Ni_xGaSe експериментально виявлено гігантський магніто-резистивний ефект, згідно з яким, при прикладанні магнітного поля електричний опір зменшується в 20 разів. Цей ефект за величиною сигнал / фоновий шум в десятки разів перевищує первинний гігантський магніто-резистивний ефект, зафіксований у наноструктурах FeCr. Таким чином, створення і дослідження магніторезистивних структур є важливим завданням для розвитку військових технологій.

Мета статті

Дослідити вплив гігантського магніторезистивного ефекту на магнітні сенсори на основі напівпровідникових кристалів, типу InSe, GaSe з домішками хрому, міді та германію. З'ясувати, за яких температур у структурах кристалів InSe, GaSe буде спостерігатися їх максимальна чутливість до збурень магнітного поля Землі. Проаналізувати вплив домішки металу, її концентрації, а також температури на електричні та магнітні властивості напівпровідникових кристалів типу InSe.

Виклад основного матеріалу

Досліджуваний зразок шаруватого напівпровідникового кристалу 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 квазідвовимірну. Атоми InSe формують шари з сильним ковалентним зв'язком, у той час як в міжшаровому просторі діє слабкий Ван-дер-Ваальсовий 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 кристалу, 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. ґратка в свою чергу буде впливати на магнітний момент інтеркалянта, що проявляється в аномальних кінетичних та магнітних властивостях таких структур [5].

Наприклад, введення елемента 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. Оскільки 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]. Вплив атомів металу 3d-групи заліза на матрицю напівпровідникових шаруватих кристалів було детально досліджено в роботі [7].

Щоб дослідити вплив домішок металів на шарувату структуру In_4Se_3 , нижче наведено залежність дійсної та уявної складової опору від частоти для кристалів In_4Se_3 з Cr (0,05%), In_4Se_3 з Cu (10%) та In_4Se_3 з Ge (0,2%).

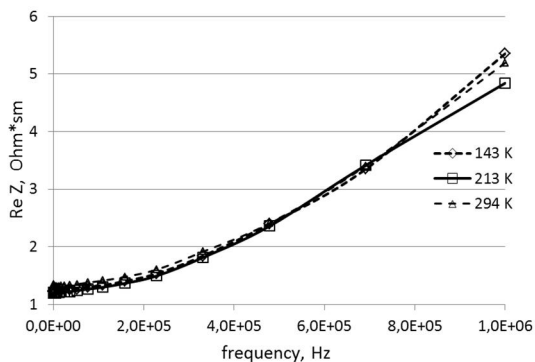


Рис. 1. Залежність дійсної складової опору Re Z від частоти для In_4Se_3 з Cr (0,05%) при різних температурах

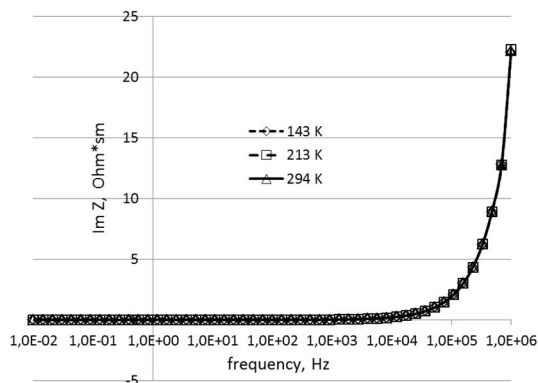


Рис. 2. Залежність уявної складової опору Im Z від частоти для In_4Se_3 з Cr (0,05%)

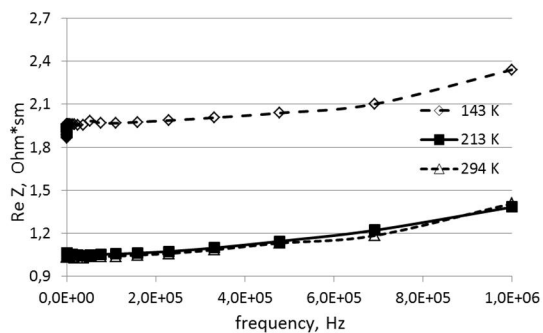


Рис. 3. Залежність дійсної складової опору Re Z від частоти для In_4Se_3 з Cu (10%)

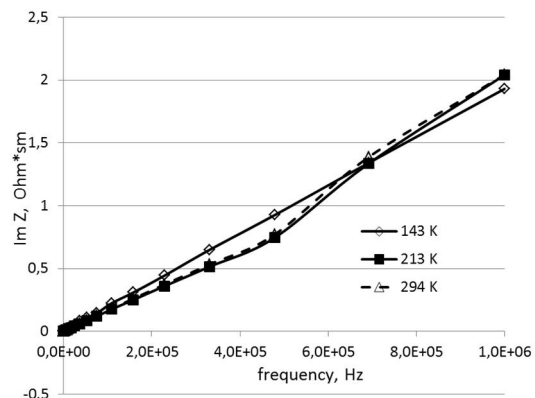


Рис. 4. Залежність уявної складової опору Im Z від частоти для In_4Se_3 з Cu (10%)

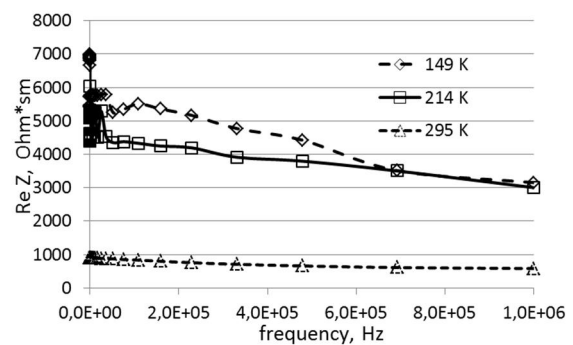


Рис. 5. Залежність дійсної складової опору Re Z від частоти для In_4Se_3 з Ge (0,2 %)

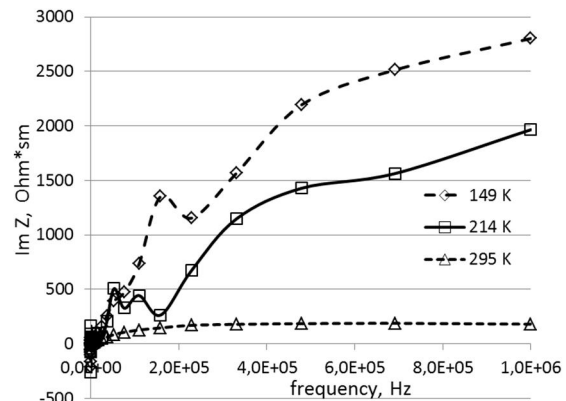


Рис. 6. Залежність уявної складової опору Im Z від частоти для In_4Se_3 з Ge (0,2 %)

Висновки

Показано, що електричні та магнітні властивості In_4Se_3 з Cr (0,05%) є стійкими до різких перепадів температур. Дійсна складова опору Re Z від частоти для In_4Se_3 з Cu (10%) різко збільшується вдвічі при наближенні до температур рідкого азоту, тоді як комплексна складова опору практично незмінна.

Питомий опір, виміряний для In_4Se_3 з Ge (0,2 %), показує сильну залежність від температури, а також є на декілька порядків більшим, ніж у двох попередніх випадках, що зумовлене тим, що струм пропускався перпендикулярно до шарів, тоді як у випадку домішок хрому та міді струм пропускався вздовж шарів. Це в черговий раз підкреслює сильну анізотропію шаруватих напівпровідникових структур.

Структури з почерговими напівпровідниковими та магнітоактивними прошарками дають принципову можливість керування магнітними властивостями. Ці структури мають різку анізотропію магнітоточливості. Тому якщо закріпити такий сенсор на вісь та обертати його з певною частотою (подібно до радіолокаційних станцій), то така система може дати змогу визначити положення об'єктів, швидкість руху яких є повільно змінною функцією.

Досліджувані напівпровідникові кристали з домішками Zr-елементів 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 magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications* / M.H. Phan, H.X. Peng // *Progress in Materials Science.* – 2008. – Vol. 53. – P. 323–420.

5. Захарченя Б.П. *Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику* / Б.П. Захарченя // *УФН.* – 2005. – Т. 175, – № 11. – С. 629–675.

6. Титов А.Н. *Фазовые диаграммы интеркалатных материалов с поляронным типом локализации носителей* / А.Н. Титов, А.В. Долгошеин // *ФТТ,* – 2000. – Т. 42. – № 3. – С. 425–427.

7. Шабатура Ю.В. *Перспективи військового застосування сенсорів магнітного поля на основі магніторезистивного ефекту в Ni_xInSe* / Ю.В. Шабатура, Б.О. Середюк, С.В. Королько, В.Л. Фоменко // *Військово-технічний збірник.* – 2012. – № 2(7). – С. 80–84.

Рецензент: д.т.н., проф. Б.І. Сокіл, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ ТИПА InSe, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ ВОЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Б.О. Середюк

В статье выполнен анализ перспектив применения магниторезистивных структур на основе полупроводниковых кристаллов типа InSe для прецизионного измерения магнитного поля. Рассмотрена возможность применения сенсоров магнитного поля на основе структуры InSe для обнаружения военной бронетехники. Исследовано влияние примесей металлов на слоистую структуру полупроводникового материала, как на сильную ковалентную связь внутри слоя, так и на слабую Ван-дер-Ваальсовую связь в межслоевом пространстве. Проанализированы вольт-амперные характеристики по переменному току кристалла In₄Se₃ с примесями хрома, меди и германия при различных температурах от комнатной до температуры жидкого азота. Обосновано влияние примеси металла и его концентрации на электрические и магнитные свойства полупроводниковых кристаллов типа InSe.

Ключевые слова: магниторезистивный эффект, магнитный сенсор, магнитное поле, детонация боеголовки.

ANALYSIS OF ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS OF InSe TYPE DOPED BY METALS DUE TO THEIR MILITARY APPLICATIONS

B. Seredyuk

The applications of magnetoresistance structures based on semiconductor crystals of InSe for high precision measurement of the magnetic field are outlined in this article. Possibilities of using magnetic field sensors based on InSe structures for revealing the armour military vehicles are discussed. The impact of metal impurities on the layered structure of the semiconductor material as referred to the strong covalent bond within the layers as well as the weak Van-der-Waals bond in the interlayer space is studied. The current-voltage characteristic for alternating current for In₄Se₃ crystal with the impurities of chromium, copper and germanium at different temperatures ranging from room temperature to liquid nitrogen is analyzed. The influence of metal impurities and its concentration on the electrical and magnetic properties of semiconductor crystals of the InSe type is discussed.

Key words: magnetoresistance effect, magnetic sensor, magnetic field, warhead detonation.