



ЧЕКМАН

Іван Сергійович — член-кореспондент НАН України, член-кореспондент НАМН України, завідувач кафедри фармакології та клінічної фармакології Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця



СИМОНОВ

Павло Вадимович — аспірант кафедри фармакології та клінічної фармакології Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця

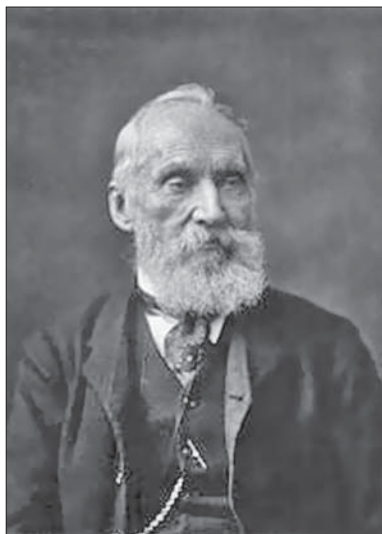
ГІГАНТСЬКИЙ МАГНЕТООПІР: ПРИРОДА ЯВИЩА, ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ, ЗАСТОСУВАННЯ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

У статті висвітлено історію відкриття явища гігантського магнетоопору та основні етапи розвитку нового науково-технологічного напрямку — спітроніки. Стисло схарактеризовано конфігурації GMR-систем, серед яких особливо перспективними є спінові клапани, системи магнітного тунельного переходу. Ці конструкції застосовуються, зокрема, в медицині. Так, спінові клапани впроваджуються в клінічну практику як сенсори для діагностики та лікування захворювань, а також відстеження наночастинок в організмі людини. Подальший розвиток спітроніки пов'язують з оптимізацією систем на основі ефекту тунельного магнетоопору та їх інтеграції з лабораторіями-на-чипі й іншими засобами нанотехнології, що сприятиме більшій ефективності діагностичних і терапевтичних медичних заходів.

Ключові слова: гігантський магнетоопір, спітроніка, Нобелівська премія, спіновий клапан, тунельний магнетоопір, лабораторія-на-чипі.

Другу половину ХХ і початок ХХІ ст. можна без перебільшення назвати епоєю мікро- та наноелектроніки. Упродовж цих років світ став свідком технологічної революції, зумовленої розвитком цифрової логіки та інформаційних технологій. Проте в будь-яких пристроях, від першого транзистора до сучасних мікропроцесорів, що вражають своїми обчислювальними можливостями, електроніка переважно використовувала лише одну властивість електрона — заряд. Однак електрон має ще одну, щоправда, суто квантово-механічну характеристику — власний момент імпульсу, або спін, який аж донедавна не привертав до себе особливої уваги розробників і дослідників. Нині ситуація змінилася, і на авансцену вийшов новий науково-технологічний напрям, що дістав назву *спітроніка*.

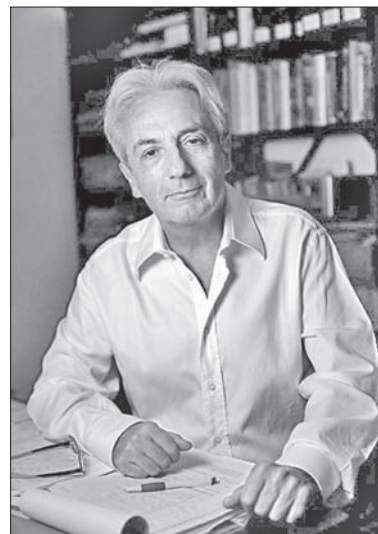
Відомо, що в зовнішньому магнітному полі власний магнітний момент електрона, зумовлений спіном, орієнтується або паралельно вектору магнітної індукції (вгору), або антипаралельно (вниз). У пристроях, побудованих на спіновому ефекті, використовують, зокрема, феромагнетики. За температури,



Вільям Томсон, лорд Кельвін



Петер Андреас Грюнберг



Альбер Ферт

нижчої за так звану точку Кюрі, феромагнетик можна умовно розбити на малі зони однорідної спонтанної намагніченості — домени. Якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє, напрямки векторів намагніченості різних доменів довільні, і сумарна намагніченість усього тіла може дорівнювати нулю. У зовнішньому магнітному полі вектори намагніченості орієнтуються в певному переважному напрямку, створюючи сильне внутрішнє магнітне поле [1].

Завданням спітроніки (спінової електроніки, або магнетоелектроніки) є розроблення приладів, робота яких заснована на властивостях електронних спінів. Це нове поле науки й технологій, на якому для створення нових функціональних пристроїв застосовуються як заряд, так і спін електрона [2].

Початок нової електроніки, яка заснована на фізичних ефектах, зумовлених спіном, відносять до 1988 р., коли було відкрито явище гігантського магнетоопору (англ. — *giant magnetoresistance*, або GMR). Однак передумови цього прориву було закладено ще в другій половині XIX ст. Усе почалося в 1857 р. з відкриття британським фізиком Вільямом Томсоном ефекту магнетоопору, що полягав у зміні опору електричного провідника під впливом зовнішнього магнітного поля. Це явище і сьо-

годні широко застосовують в електронних пристроях, серед яких — уже такі звичні жорсткі комп'ютерні диски для збереження інформації, а також сенсори для виявлення зміни характеристик магнітного поля. Останні широко використовують у медицині [3, 4].

1988 рік ознаменувався загальним проривом у фізиці й зокрема в електроніці — науковий світ дізнався про існування ефекту гігантського магнетоопору. Цікаво, що це відкриття здійснили незалежно дві групи дослідників — у Юліхському дослідницькому центрі під керівництвом німецького фізика Петера Андреаса Грюнберга (Peter Andreas Grünberg) та в Університеті Париж-Південь XI під керівництвом французького вченого Альбера Ферта (Albert Fert). Обидва наукові колективи незалежно один від одного спостерігали явище зменшення електричного опору в тонких багатошарових металічних структурах під впливом зовнішнього магнітного поля. А. Ферт описав новий феномен, давши йому назву «гігантський магнетоопір», тоді як П. Грюнберг окреслив потенційну сферу застосування сенсорів, побудованих на цьому принципі, і подав відповідну заявку на патент. Неймовірно, але факт — обидві дослідницькі групи незалежно одна від одної представили результати влас-

них досліджень на одній і тій самій конференції та опублікували відповідні роботи у одному й тому самому журналі Physical Review Journal за 1988 рік. Коли автори дізналися про такий дивовижний збіг обставин, то вирішили подружньому поділити лаври і разом володіти правами на відкриття [5, 6].

А. Ферт і П. Грюнберг займалися моделюванням систем на основі послідовних шарів магнітного і немагнітного матеріалу завтовшки у кілька атомів. І хоча початкові прототипи таких елементів працювали лише в умовах наднизьких температур, фізики невдовзі винайшли матеріали і методи для відтворення технології за кімнатної температури [7].

Відкриття GMR стало несподіванкою: хоча ефект магнетоопору вже був добре відомий фізикам, проривів у цьому напрямі не спостерігалося впродовж останніх 130 років досліджень. А. Ферт і П. Грюнберг сформулювали визначення гігантського магнетоопору як квантово-механічного ефекту, що спостерігається в металевих плівках з послідовних феромагнітних і провідних немагнітних шарів і полягає у значній зміні електричного опору таких структур при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів під дією зовнішнього магнітного поля. В основі ефекту, як виявилось, лежить розсіяння електронів, яке залежить від напрямку спіну [4].

У 2007 р. за цей неймовірний ривок у науці А. Ферта і П. Грюнберга було удостоєно Нобелівської премії з фізики. Нобелівський комітет так описав значущість їхньої роботи: «Відкриття гігантського магнетоопору відчинило двері до безлічі нових наукових та технологічних можливостей. Історія ефекту GMR наочно демонструє, як абсолютно несподіване наукове відкриття може дати поштовх до розвитку зовсім нових технологій та створення нових комерційних продуктів» [8].

Нині дослідження зі створення та застосування GMR-елементів інтенсивно проводяться у багатьох країнах світу, зокрема й в Україні [9–11]. Розроблено кілька конфігурацій таких систем: багатошарові структури, спінові клапани, системи магнітного тунельного переходу та конфігурація гранульованого сплаву (рис. 1) [12].

Так, *багатошарові структури* складаються з двох і більшого числа шарів феромагнетика зі сплаву Fe—Co—Ni завтовшки 4–6 нм, розділених надтонким (3–5 нм) шаром провідника — немагнітного металу, яким зазвичай є мідь. Взаємні орієнтації намагніченості шарів у системі можна змінювати то в одному, то в іншому напрямках. Якщо намагніченість шарів спрямована однаково, через провідник легко проходять електрони провідності, якщо напрямки протилежні — виникає опір. У цій

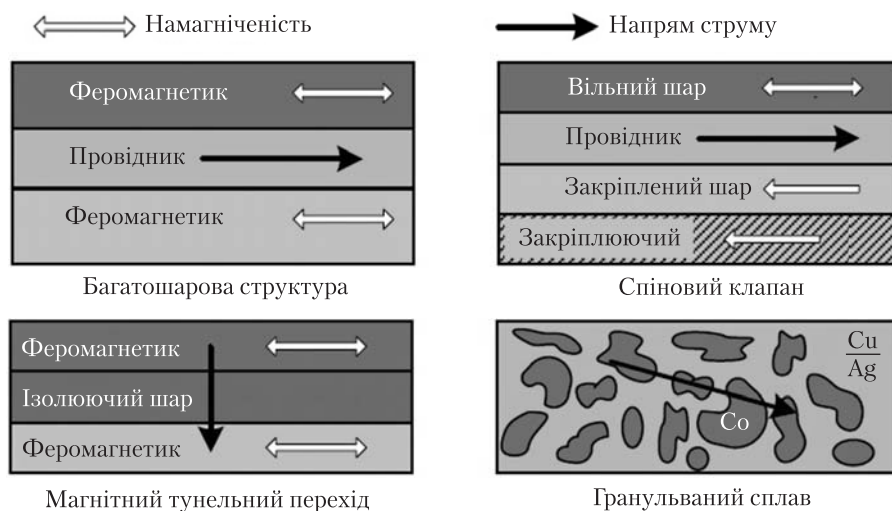


Рис. 1. Різноманітність конфігурацій GMR-систем; пояснення див. у тексті [12]

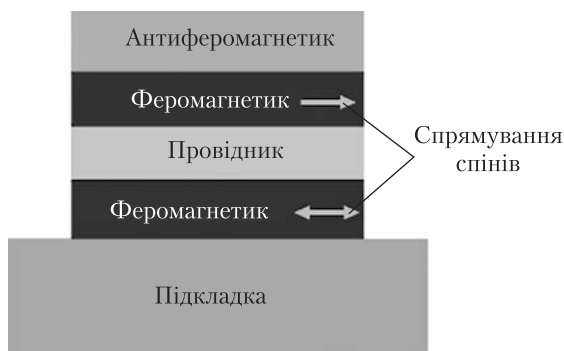


Рис. 2. Принцип побудови спінового клапана; пояснення див. у тексті [9]

конфігурації можна досягти різниці опорів у 4–9% і більше за умови множинного повторення базової структури [13].

Окремо виділяють конфігурацію *спінового клапана*, в якій до багатошарової структури зверху чи знизу додають шар антиферромагнетика (закріплюючий шар). Таким чином у прилеглому шарі ферромагнетика (закріпленому шарі) завдяки утворенню межі поділу досягається «фіксація» магнітного поля, інакше кажучи, намагніченість цього шару відносно нечутлива до змін зовнішнього магнітного поля. Другий шар ферромагнетика є «вільним» — його намагніченість змінюється під дією зовнішнього магнітного поля (рис. 2). Опір спінового клапана при антипаралельних магнітних полях у ферромагнетиках на 4–20% вищий, ніж при паралельних [1]. Спіновий клапан вважають відкритим, якщо намагніченості в його шарах орієнтовані паралельно, та закритим — у протилежному випадку.

Магнетоопір збільшується при нанесенні усередині закріплюючого шару або поверх вільного шару додаткової плівки з наноксидів. Ефект досягається завдяки дзеркальному розсіюванню електронів провідності на поверхні поділу метал/ізолюючий шар [14–17].

У випадку системи *магнітного тунельного переходу* шари ферромагнетика розділені не провідником, а надтонким ізолюючим матеріалом (тунельним бар'єром). Електрони проходять таку плівку за принципом спінзалежного тунелювання. Це явище дістало назву «ефект

тунельного магнетоопору». Як впливає з квантово-механічних постулатів, імовірність тунелювання вища за умови паралельності обох магнітних моментів. В експериментальних приладах з метою підвищення продуктивності всієї системи часто застосовують поєднання ефекту тунелювання з принципом роботи спінового клапана. Як ізолюючий шар використовують сполуки Al_2O_3 та MgO . Системи магнітного тунельного переходу теоретично здатні надавати різницю опорів 70% і більше, але впровадження цих елементів у практику потребує проведення подальших досліджень. Так, принцип тунельного магнетоопору покладено в основу новітніх експериментальних пристроїв магнеторезистивної оперативної пам'яті (MRAM), однак продуктивності елементів магнітного тунельного переходу ще не достатньо для оптимальної роботи цих систем [18–20].

Ще одна конфігурація GMR-систем — *гранульовані плівки* Co-Cu та Co-Ag , які також виявляють ефект гігантського магнетоопору. У цьому випадку він пов'язаний зі спінзалежним розсіюванням електронів на межі кластерів Co . Параметри приладів з такою конфігурацією GMR-елементів значною мірою залежать від умов синтезу та оброблення наногранул (кластерів). Ступінь магнетоопору при цьому залежить від розміру кластерів Co , що становить переважно близько 30 нм у діаметрі та 10 нм заввишки. Є також подібні системи зі значно меншим розміром кластерів — до 2 нм. Різниця опорів у таких системах зазвичай становить $\leq 9\%$ [21].

В останні роки розвиток нанотехнологій та винайдення таких пристроїв, як *лабораторійна чипі*, надали нового поштовху створенню приладів нанофлюїдики, здатних транспортувати рідину наноканалами, з можливістю подальшого проведення якісного і кількісного визначення складових дослідного матеріалу. З огляду на цей факт спінтроніка має стати новою перспективною технологією розвитку біосенсорів і біочипів [22–25].

Комерціалізація ефекту GMR — першої хвилі спінтроніки — відбулася досить швидко по-

рівняно з іншими передовими технологіями. Нині спінтроніка — це галузь, яка стрімко розвивається, вона перебуває у фокусі багатьох наукових програм по всьому світу, однак потенціал практичного призначення цього ефекту ще далеко не вичерпаний. Ефект GMR уже сьогодні застосовують у магнітних голівках для зчитування інформації з жорстких дисків, а також у багатьох сенсорах і датчиках. Розробляються такі новітні технології, як сканери для розпізнавання наземних мін, а також уже згадувані MRAM-пристрої, в яких спіни електронів використовують для кодування даних. Першу комерційно доступну магнітну голівку жорсткого диску, що працювала за принципом GMR і мала будову багат шарової плівки з послідовних компонентів [NiFe (15 нм)/Cu (2,6 нм)/FeNi (15 нм)/FeMn (10 нм)], розробила корпорація IBM у 1997 р., після чого місткість вінчестерів зросла у сотні разів [6, 26, 27].

GMR-сенсори знайшли застосування й у рослинництві — для контролю умов росту та поливу, дослідження врожайності рослин, а також для визначення необхідних заходів захисту врожаю [28].

У медицині високороздільні GMR-сенсори застосовують з метою виявлення невидимих тріщин у медичних імплантатах, проведення тестів з дослідження протеїнів і ДНК у молекулярній діагностиці захворювань [29–32]. Автори роботи [30] повідомляють про виявлення за допомогою GMR-датчика штаму *Escherichia coli O157:H7* у таких продуктах харчування, як м'ясо та молоко.

Учені розробили мікроскопічний GMR-сенсор з конфігурацією спінового клапана для виявлення нанорозмірних суперпарамагнітних маркерів у біологічному матеріалі *in vitro*. Доведено, що прилад здатний за кімнатної температури виявляти мінімальні дози монодисперсних наночастинок Fe_3O_4 розміром 16 нм з найменшою кількістю 23 елементи. Відгук сенсора посилювався пропорційно збільшенню кількості наночастинок, ця залежність мала лінійний характер [33].

Принцип роботи систем виявлення сполук за допомогою GMR у медицині полягає у

маркуванні біомолекул магнітними мікро- або наночастинами та виявленні магнітного поля розсіювання цих частинок GMR-сенсором після взаємодії маркера з мішенню [24, 34]. GMR-датчики вигідно відрізняються від інших чутливістю, широким діапазоном визначення, дешевизною та портативністю, можливістю проводити вимірювання за кімнатної температури, гнучкістю застосування. Їх перевагою також є можливість інтеграції пристроїв з лабораторією-на-чипі [35, 36]. Для того щоб досягти необхідної чутливості, тобто визначення окремих молекул, розмір магнітних маркерів має бути сумірним з досліджуваними біомолекулами. У випадку ДНК ідеальним є розмір частинок 20 нм і менше [37]. Такі наночастинок не заважатимуть міжмолекулярній взаємодії, крім того, одна частинка з'єднуватиметься з однією молекулою ДНК, що дасть змогу з високою точністю кількісно інтерпретувати результати. Точності визначення сприяє також монодисперсність магнітних наночастинок за розміром та магнітним моментом, чого важко досягти у разі застосування мікрочастинок [24, 34, 38, 39].

З іншого боку, такі малі частинки становлять проблему при визначенні за допомогою сенсорів, оскільки їхні магнітні моменти дуже малі через обмежений фізичний об'єм, відносно велику площу поверхні та значний температурний вплив на магнітні моменти, тобто суперпарамагнетизм. Саме тому для виявлення таких надмалих маркерів необхідно використовувати детектори, засновані на явищі GMR.

Малий фізичний об'єм наночастинок обмежує їхні магнітні моменти, а отже — й магнітні поля розсіювання. Саме з цієї причини у власному оригінальному дослідженні G. Li з колегами застосували GMR-сенсор з конфігурацією спінового клапана, адже він має високу чутливість до слабого магнітного поля наночастинок. Цей експеримент довів доцільність і ефективність використання мікроскопічних спінових клапанів у виявленні та кількісному визначенні монодисперсних суперпарамагнітних наночастинок як магнітних маркерів у біодіагностиці [33].

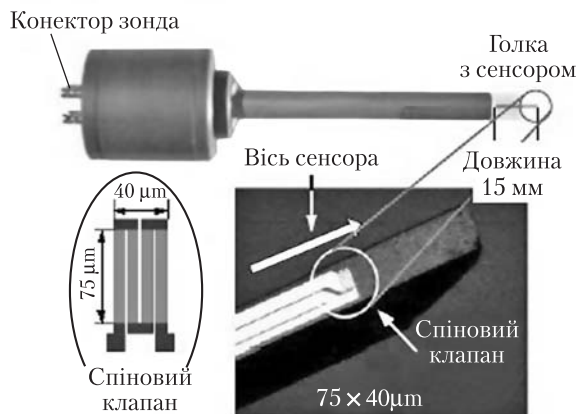


Рис. 3. Конструкція апарата з GMR-сенсором (конфігурація спінового клапана); пояснення див. у тексті [40]

Ще в одному з досліджень GMR-сенсор з конфігурацією спінового клапана застосовували для визначення розподілу наночастинок при гіпертермії в організмі *in vivo*, а також для вимірювання мікрострумів нервової системи [40]. Апарат мав вигляд голки (рис. 3), сконструйованої спеціально для полегшення введення в тіло пацієнта з метою проведення досліджень *in vivo*. GMR-сенсор площею 75×40 мкм розміщували на кінчику голки. Довжина голки 20 мм забезпечувала мінімальну інвазивність процедури та оптимальні умови для вимірювання щільності магнітного потоку.

Переміщення магнітних наночастинок в організмі пацієнта можна контролювати за допомогою зовнішнього магнітного поля, тому такі наноструктури є перспективними для адресної доставки ліків, як контрастні агенти у МРТ, а також за умов додаткового нагрівання цим зовнішнім магнітним полем для гіпертермії при лікуванні злоякісних новоутворень. З огляду на те, що в усіх описаних вище випадках колоїдний розчин з наночастинками в організмі пацієнта піддається розподілу, важливо вміти визначити концентрацію наночастинок у певних органах перед та після проведення клінічних процедур. Голка з GMR-сенсором призначена для відстеження наночастинок саме у таких випадках [41].

Важливим параметром при проведенні діагностики та лікування таких захворювань, як множинний склероз, хвороби Альцгеймера і Паркінсона, може виявитися розподіл магнітного поля нервової системи. При цьому доцільно застосовувати розглянутий апарат зі спіновим клапаном. Під час дослідження голку вводять у тіло пацієнта поблизу нерва так, щоб розташувати її в безпосередній близькості до його бічної площини, після чого вимірюватимуть магнітне поле, створене навколо довгого тонкого провідника, яким є нерв. У дослідженні S. Yamada з метою імітації нерва брали дріт радіусом 15 мкм. Нервовий імпульс симулювали електричним струмом частотою 1 кГц. Голка сенсора при цьому безпосередньо торкалася дроту. Сигнал сенсора на виході посилювався у 1000 разів і аналізувався за допомогою осцилографа чи синхронізувального підсилювача [42].

Отже, відкриття явища гігантського магнетоопору сприяло виникненню і розвитку нового наукового й технологічного напрямку — спітроніки, в якій значна увага приділялася спіну електрона — квантово-механічній характеристиці, що відображує власний момент імпульсу частинки. Розроблено різні конфігурації GMR-систем, серед яких найперспективнішими є спінові клапани і системи магнітного тунельного переходу. Гігантський магнетоопір знайшов застосування в електронних приладах, розроблених для багатьох галузей господарства, зокрема для медицини. Сьогодні спінові клапани впроваджують у клінічну практику як сенсори для діагностики та лікування захворювань, а також відстеження наночастинок в організмі людини. У подальшому спітроніка, скоріш за все, розвиватиметься в напрямі оптимізації систем на основі ефекту тунельного магнетоопору та інтеграції їх з лабораторіями-на-чипі та іншими засобами нанофлюїдики, квантової фармакології, що допоможе ефективніше здійснювати діагностичні й терапевтичні медичні заходи [42].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Barash L.* Spintronics — электроника следующего поколения. — http://ko.com.ua/spintronika_-_jelektronika_sleduyushhego_pokoleniya_11278.
2. *Awschalom D.D., Flatté M.E., Samarth N.* Spintronics // *Sci. Am.* — 2002. — V. 286, N 6. — P. 66–73.
3. *Djamal M., Ramli S., Yulkifli A. et al.* Biosensor based on giant magnetoresistance material // *Int. J. E-Health Med. Comm.* — 2010. — V. 1, N 3. — P. 1–16.
4. *McCray W.P.* From lab to iPod: A story of discovery and commercialization in the post-cold war era // *Tech. Cult.* — 2009. — V. 50. — P. 58–81.
5. *Day C.* Discoverers of giant magnetoresistance win this year's physics Nobel // *Phys. Today.* — 2007. — V. 60, N 12. — P. 12–14.
6. *Shinjo T.* Artificial multilayers and nanomagnetic materials // *Proc. Jpn. Acad. Ser. B. Phys. Biol. Sci.* — 2013. — V. 89, N 2. — P. 80–96.
7. *Ornes S.* Giant magnetoresistance // *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 2013. — V. 110, N 10. — P. 3710.
8. The discovery of giant magnetoresistance scientific background on the Nobel Prize in physics, 2007 / The Royal Swedish Academy of Sciences, 2007. — 17 p.
9. *Дехтярук Л.В.* Гигантський магнорезистивний ефект в магнітоупорядочених трохшарових плівках // *Вісн. СумДУ. Сер. Фізика, математика, механіка.* — 2007. — № 2. — С. 120–126.
10. *Покладок Н.Т., Григорчак І.І., Попович Д.І. та ін.* Гигантський магнорезистивний ефект у напівпровідниках з магнетоактивними нанопрошарками // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* — 2008. — Т. 6, № 1. — С. 9–16.
11. *Проценко І.Ю., Яворский Я., Чешко І.В.* Явище гігантського магнітного опору в багатошарових плівкових системах // *Вісн. СумДУ. Сер. Фізика, математика, механіка.* — 2004. — № 10. — С. 65–81.
12. *Reig C., Cubells-Beltran M.D., Muñoz D.R.* Magnetic field sensors based on giant magnetoresistance (GMR) technology: applications in electrical current sensing // *Sensors (Basel).* — 2009. — V. 9, N 10. — P. 7919–7942.
13. *Ranchal R., Torija M., Lopez E. et al.* The influence of anisotropy on the magnetoresistance of permalloy–copper–permalloy thin films // *Nanotechnology.* — 2002. — V. 13, N 3. — P. 392–397.
14. *Dalichaouch Y., Singsaas A.L., Putris F. et al.* Low-frequency electromagnetic technique for nondestructive evaluation // *Proc. SPIE.* — 2000. — V. 3994. — P. 2–9.
15. *Dieny B., Speriosu V.S., Metin S. et al.* Magnetotransport properties of magnetically soft spin-valve structures // *J. Appl. Phys.* — 1991. — V. 69. — P. 4774–4779.
16. *Jander A., Smith C., Schneider R.* Magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation // *Proc. SPIE.* — 2005. — V. 5770. — P. 1–13.
17. *Veloso A., Freitas P.P., Wei P. et al.* Magnetoresistance enhancement in specular, bottom-pinned, $Mn_{83}Ir_{17}$ spin valves with nano-oxide layers // *Appl. Phys. Lett.* — 2000. — V. 77. — P. 1020–1022.
18. *Ferreira R., Wisniowski P., Freitas P.P. et al.* Tuning of MgO barrier magnetic tunnel junction bias current for picotesla magnetic field detection // *J. Appl. Phys.* — 2006. — V. 99. — P. 08K706(1–3).
19. *Parkin S.S.P., Fontana R.E., Marley A.C.* Low-field magnetoresistance in magnetic tunnel junctions prepared by contact masks and lithography: 25% magnetoresistance at 295 K in mega-ohm micron-sized junctions // *J. Appl. Phys.* — 1997. — V. 81. — P. 5521.
20. *Ziese M., Thornton M.J.* Spin Electronics: Lecture Notes in Physics. — Berlin: Springer, 2001. — 493 p.
21. *Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Carey M.J. et al.* Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys // *Phys. Rev. Lett.* — 1992. — V. 68, N 25. — P. 3745–3748.
22. *Сімонов П.В., Цехмістер Я.В., Чекман І.С. та ін.* Нанобіологія, біоміметика та природні наноструктури: фізико-хімічний та біологічний аспекти // *Укр. наук.-мед. молодіж. журн.* — 2012. — № 2. — С. 25–29.
23. *Чекман І.С., Сімонов П.В.* Природні наноструктури та наномеханізми. — К.: Задруга, 2012. — 104 с.
24. *Baselt D.R., Lee G.U., Natesan M. et al.* A biosensor based on magnetoresistance technology // *Biosens. Bioelectron.* — 1998. — V. 13, N 7–8. — P. 731–739.
25. *Chekman I.S., Simonov P.V.* Structure and function of biological membranes: the impact of nanoparticles // *Int. J. Phys. Pathophys.* — 2012. — V. 3, N 2. — P. 187–208.
26. *Childress J.R., Fontana R.E. Jr.* Magnetic recording read head sensor technology // *Compt. Rendus Phys.* — 2005. — V. 6. — P. 997–1012.
27. *Pelegri J., Ramirez D., Sanchis E. et al.* Giant magnetoresistive sensor in conductance control of switching regulators // *IEEE Trans. Magn.* — 2000. — V. 36. — P. 3578–3580.

28. *Thessler S., Kooistra L., Teye F. et al.* Geosensors to support crop production: current applications and user requirements // *Sensors (Basel)*. — 2011. — V. 11, N 7. — P. 6656–6684.
29. *Hall D.A., Gaster R.S., Lin T. et al.* GMR biosensor arrays: a system perspective // *Biosens. Bioelectron.* — 2010. — V. 25, N 9. — P. 2051–2057.
30. *Mujika M., Arana S., Castaño E. et al.* Magnetoresistive immunosensor for the detection of *Escherichia coli O157:H7* including a microfluidic network // *Biosens. Bioelectron.* — 2009. — V. 24, N 5. — P. 1253–1258.
31. *Wang S.X., Li G.* Advances in giant magnetoresistance biosensors with magnetic nanoparticle tags: Review and outlook // *IEEE Trans. Magn.* — 2008. — V. 44. — P. 1687–1702.
32. *Xu L., Yu H., Han S.J. et al.* Giant Magnetoresistive Sensors for DNA Microarray // *IEEE Trans. Magn.* — 2008. — V. 44, N 11. — P. 3989–3991.
33. *Li G., Sun S., Wilson R.J. et al.* Spin valve sensors for ultrasensitive detection of superparamagnetic nanoparticles for biological applications // *Sens. Actuators A. Phys.* — 2006. — V. 126, N 1. — P. 98–106.
34. *Schotter J., Kamp P.B., Becker A. et al.* Comparison of a prototype magnetoresistive biosensor to standard fluorescent DNA detection // *Biosens. Bioelectron.* — 2004. — V. 19, N 10. — P. 1149–1156.
35. *Chemla Y.R., Grossman H.L., Poon Y. et al.* Ultrasensitive magnetic biosensor for homogeneous immunoassay // *PNAS*. — 2000. — V. 97, N 26. — P. 14268–14272.
36. *Enpuku K., Minotani T., Gima T. et al.* Detection of magnetic nanoparticles with superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer and application to immunoassays // *J. Appl. Phys. P. 2 (Lett.)*. — 1999. — V. 38. — P. L1102–L1105.
37. *Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K. et al.* Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine // *J. Phys. D. Appl. Phys.* — 2003. — V. 36. — P. R167–R181.
38. *Sun S., Murray C.B., Weller D. et al.* Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices // *Science*. — 2000. — V. 287, N 5460. — P. 1989–1992.
39. *Sun S., Zeng H., Robinson D.B. et al.* Monodisperse MFe_2O_4 ($M = Fe, Co, Mn$) nanoparticles // *J. Am. Chem. Soc.* — 2004. — V. 126, N 1. — P. 273–279.
40. *Yamada S.* High-spatial-resolution magnetic-field measurement by giant magnetoresistance sensor — applications to nondestructive evaluation and biomedical engineering // *Int. J. Smart Sens. Intel. Sys.* — 2008. — V. 1, N 1. — P. 160–175.
41. *Reiss G., Hütten A.* Magnetic nanoparticles: applications beyond data storage // *Nat. Mater.* — 2005. — V. 4, N 10. — P. 725–726.
42. *Чекман І.С.* Квантова фармакологія. — К.: Наук. думка, 2012. — 181 с.

Стаття надійшла 22.01.2014.

І.С. Чекман, П.В. Симонов

Национальный медицинский университет им. А.А. Богомольца
просп. Победы, 34, Киев, 03057, Украина

ГИГАНТСКОЕ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ: ПРИРОДА ЯВЛЕНИЯ, ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

В статье освещены основные этапы истории открытия явления гигантского магнетосопротивления (GMR) и развития нового научного и технологического направления — спинтроники. Кратко охарактеризованы конфигурации GMR-систем, среди которых особенно перспективными являются спиновые клапаны, системы магнитного туннельного перехода. Данные конструкции нашли применение, в частности, в медицине. Так, спиновые клапаны внедряются в клиническую практику в виде сенсоров для диагностики и лечения заболеваний, а также отслеживания наночастиц в организме человека. В будущем спинтроника будет развиваться по направлению оптимизации систем на основе эффекта туннельного магнетосопротивления и интеграции последних с лабораториями-на-чипе и другими средствами нанофлюидики, что обеспечит более эффективное осуществление диагностических и терапевтических медицинских процедур.

Ключевые слова: гигантское магнетосопротивление, спинтроника, Нобелевская премия, спиновый клапан, туннельное магнетосопротивление, лаборатория-на-чипе.

I.S. Chekman, P.V. Simonov

Bogomolets National Medical University
34 Peremohy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine

GIANT MAGNETORESISTANCE: THE CHARACTER OF PHENOMENON,
THE HISTORY OF DISCOVERY, AN IMPLEMENTATION IN BIOLOGY AND MEDICINE

The major milestones of the history of discovery of the giant magnetoresistance (GMR) phenomenon and development of new scientific and technological field of spintronics are highlighted in the article. GMR systems' configurations, among which especially promising spin valves and magnetic tunnel junction systems, are briefly characterized. These devices find their use, particularly, in medicine. For instance, spin valves are introduced in medical practice as sensors for diseases' diagnosis and treatment and as devices which track nanoparticles in an organism. Spintronics will develop in direction of an optimization of tunnel magnetoresistance systems and an integration of those into lab-on-a-chip technologies and other nanofluidics devices. That will improve an efficacy of diagnostic and therapeutic procedures' performance.

Keywords: giant magnetoresistance, spintronics, Nobel Prize, spin valve, tunnel magnetoresistance, lab-on-a-chip.