

PHYSICAL SENSORS

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.38

НОВИЙ КРЕМНІЄВИЙ ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В. Г. Вербицький, К. В. Кривохижа, О. Г. Кухаренко, М. Г. Толмачов, О. В. Третяк

Інститут високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
просп. Глушкова 4-г, 03022, Київ, Україна, тел. (044) 521-3566, <http://iht.univ.kiev.ua>
V.G.verbitskiy@gmail.com, daan@univ.kiev.ua, oleh_sumy@ukr.net, oleg.tretiak@gmail.com

НОВИЙ КРЕМНІЄВИЙ ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В. Г. Вербицький, К. В. Кривохижа, О. Г. Кухаренко, М. Г. Толмачов, О. В. Третяк

Анотація. Досліджувались структури у вигляді планарного кремнієвого р-п переходу, в область просторового заряду якого вводились парамагнітні центри шляхом опромінення високоенергетичними іонами He^+ . Експериментально підтверджено зміну провідності таких структур в умовах спінового резонансу. З'ясовано, що величина цієї зміни суттєво не залежить від напруженості магнітного поля. Це явище може бути використано для створення широкодіапазонного безкалібровочного датчика магнітного поля.

Ключові слова: р-п перехід, радіаційні дефекти, парамагнітні центри, спін-залежний струм, датчик магнітного поля

NEW SILICON MAGNETIC FIELD SENSOR

V. G. Verbitskiy, K. V. Kryvokhyzha, O. G. Kukhareenko, M. G. Tolmachov, O. V. Tretiak

Abstract. The structures in a form of planar silicon p-n junction were investigated. In their space charge region paramagnetic centers were induced by high energy He^+ ions irradiation. These structures demonstrate a change of conductivity in the spin resonance conditions, which was confirmed experimentally. It was found that the magnitude of conductivity change is substantially independent of

the magnetic field. This phenomenon can be used to create a wide-range magnetic field sensor, which requires no calibration.

Keywords: *p-n* junction, radiation defects, paramagnetic centers, spin-dependent current, magnetic field sensor

НОВЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. Г. Вербицкий, К. В. Кривохижа, О. Г. Кухаренко, Н. Г. Толмачев, О. В. Третьак

Аннотация. Исследовались структуры в виде планарного кремниевого *p-n* перехода, в область пространственного заряда которого вводились парамагнитные центры методом облучения высокоэнергетическими ионами He^+ . Экспериментально подтверждено изменение проводимости таких структур в условиях спинового резонанса. Установлено, что величина этого изменения существенно не зависит от напряженности магнитного поля. Это явление может быть использовано для создания широкодиапазонного безкалибровочного датчика магнитного поля.

Ключевые слова: *p-n* переход, радиационные дефекты, парамагнитные центры, спин-зависимый ток, датчик магнитного поля

Вступ

Визначення напруженості магнітного поля H і його розподілу в просторі відіграє важливу роль в дослідженні та практичному застосуванні величезної кількості різноманітних ефектів в точних науках. Всі методи вимірювання H можна умовно поділити на резонансні та нерезонансні. При нерезонансному методі вимірюють значення деякої фізичної величини A , яка певним (нерезонансним) чином залежить від напруженості магнітного поля: $A = f(H)$. Шукане значення H знаходять із значення A та відомої функціональної залежності $H = f^{-1}(A)$.

Точність визначення H в таких методах визначається точністю вимірювання фізичної величини A (наприклад, електричного струму в ефекті Хола), і зазвичай не перевищує 1-5%. В ряді випадків такої точності може бути недостатньо. Наприклад, величину струму, що генерується потужними промисловими електричними генераторами, значення якого може перевищувати 10^3 А, необхідно вимірювати зі значно більшою точністю. На сьогодні найбільш популярним методом вимірювання кілоамперних струмів є метод виміру напруженості магнітного поля навколо провідника з таким струмом за допомогою системи холівських датчиків з подальшим обчисленням величини струму за відомими алгоритмами. По вищев-

казаним причинам, отримане таким чином значення струму навряд чи задовольняє виробника. Можна назвати багато інших наукових та прикладних задач, де використання нерезонансних методів не дає необхідної точності.

Резонансні методи вимірювання H (ЕПР, ЯМР) ґрунтуються на вимірюванні частоти спигового резонансу ν , а значення напруженості магнітного поля отримується з формули

$$H = \frac{2\pi\nu}{\gamma},$$

де γ – відоме магнітомеханічне відношення. Очевидно, що резонансні датчики не потребують попередньої калібровки – достатньо лише вимірювати частоту ν з необхідною точністю. До того ж γ не залежить від температури, що усуває необхідність спеціальних систем температурної стабілізації або компенсації (на відміну від датчиків Хола).

В звичайних резонансних методах момент резонансу реєструється по збільшенню поглинання високочастотного поля зразком матеріалу з парамагнітними центрами. Для надійної реєстрації резонансу кількість парамагнітних центрів (а отже й об'єм матеріалу) має бути якомога більшим, а неоднорідність вимірюваного магнітного поля (яка впливає на ширину резонансної лінії) має бути якомога меншою. Ці умови накладають обмеження на точність методів ЕПР та ЯМР на рівні 10^{-4} . [1, 2]

Метод електрично детектованого магнітного резонансу (ЕДМР) ґрунтується на зміні провідності зразка $\Delta\sigma/\sigma$ (а отже й струму через нього $\Delta i/i$) в умовах спінового резонансу. Така зміна провідності може спостерігатися на структурах, де працює механізм спінзалежного протікання струму. Докладніше результати досліджень спінзалежних електронних переходів в напівпровідниках та структурах на їх основі викладені в роботах [3, 4]. При кімнатній температурі мінімальну зміну провідності зразка $\Delta\sigma/\sigma$ можна зареєструвати на рівні 10^{-9} [4], а максимальна величина в досліджуваних зразках досягає рівня 10^{-3} , і суттєво не змінюється в широкому діапазоні напруженості магнітного поля (10 – 3300 Е). Тому резонансний сигнал можна спостерігати з великим відношенням „сигнал/шум” в широкому діапазоні полів. Слід зазначити, що в методі ЕДМР значення напруженості магнітного поля визначається положенням резонансного піку, яке від температури не залежить. До того ж, амплітуда сигналу ЕДМР не залежить від розмірів зразка, що дозволяє створювати датчики магнітного поля з розмірами активної області 1 мм^3 і менше. Це відкриває перспективи виміру розподілу напруженості сильно неоднорідних магнітних полів.

Однак в досліджуваних раніше зразках парамагнітні центри вводилися слабо контрольованими методами (механічна обробка поверхні [3], пластична деформація [4], введення дислокацій, та ін). В даній роботі розроблено та реалізовано спосіб введення парамагнітних центрів в р-п перехід кремнієвого діода контрольованим та відтворюваним методом бомбардування р-п переходу іонами водню або гелію.

Ідея експерименту

В будь-якому електричному колі струм визначається переважно ділянкою з найбільшим опором. Для діода при зворотньому зміщенні такою ділянкою є область просторового заряду (ОПЗ). Струм через цю область визначається струмом насичення діода та явищами переносу за участю дефектів. Як правило, при наявності дефектів струм через них значно перевищує струм насичення. Очевидно, що для досягнення значної величини зміни струму в умовах спінового резонансу потрібно ввести

в ОПЗ максимальну кількість парамагнітних центрів (дефектів). Відомо [5], що такі дефекти утворюються, зокрема, внаслідок опромінення напівпровідника високоенергетичними іонами. Проте розподіл дефектів вздовж трека пробігу частинки неоднорідний – переважна більшість дефектів утворюється в невеликій області в кінці шляху пробігу іонів [6]. Ця область має відносно невелику товщину і знаходиться на деякій глибині від опроміненої поверхні. Завдяки цьому усувається вплив поверхні та крайових ефектів на струм в р-п переході. Глибина ж залежить від енергії іонів та їх типу. Основною метою експерименту було суміщення ОПЗ р-п переходу та зони максимального дефектоутворення шляхом вибору енергії та типу іонів, а також параметрів зразка.

Об'єкт дослідження

Зразки виготовлені в Інституті мікроприладів НАН України. Будову окремого досліджуваного зразка зображено на рис. 1.

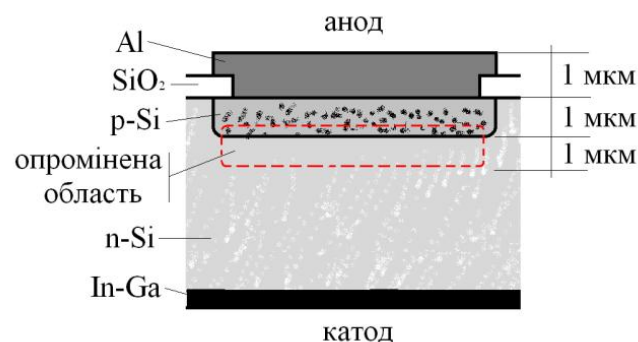


Рис. 1. Структура зразка.

Зразок являє собою планарний діод. Виготовлено його з пластини кремнію n-типу КЕФ-4.5, в якій методом дифузії бору утворено кишень р-типу. Омичний контакт до р-типу – напилений алюмінієм з проміжним шаром p^+ . Омичний контакт до n-типу створено шляхом втирання індій-галієвої пасти зі зворотнього боку пластини. Площа р-п переходу $1 \times 0.25 \text{ мм}^2$, товщина ОПЗ 1-2 мкм, відповідно об'єм активної області $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3$.

Пунктирною лінією зазначено опромінену область. Опромінення проводилось іонами He^+ з енергією 1 MeV і дозою 10^{16} см^{-2} на київському скануючому ядерному мікросонді [7].

Вказана доза набиралась шляхом сканування р-кишені через алюмінієвий контакт мікропучком іонів діаметром до 100 мкм в декілька проходів. Згідно [6] для вказаних іонів максимальна кількість дефектів утворюється на глибині 3 мкм рахуючи від поверхні алюмінію (рис. 2).

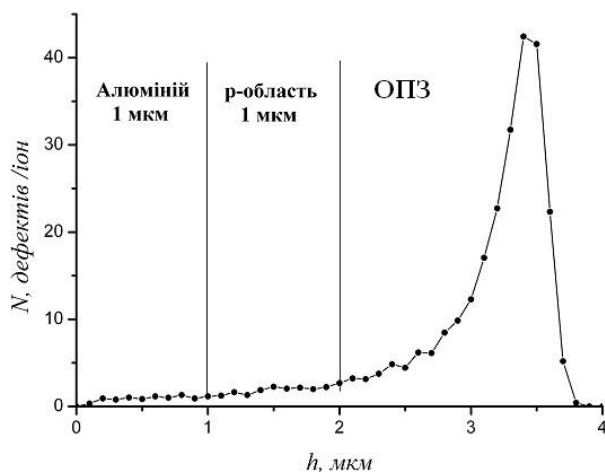


Рис. 2. Розподіл дефектів вздовж треку іонів.

Після опромінення зразки відпалювались протягом 1 години при температурі 340°C у вакуумі не гірше $2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Відпал призводить до покращення параметрів діода, збільшення абсолютної величини сигналу ЕДМР та збільшення відношення „сигнал/шум”.

Методика вимірювання спінозалежного струму

Виміри проводились при кімнатних температурах в полях від 4 до 3300 ерстед, відповідно резонансні частоти 12 МГц та 9.3 ГГц. Зразок з підведеними контактами розміщувався всередині резонатора (для слабких полів – котушка послідовного LC-контур), в який подавалось модульоване ВЧ випромінювання. Модуляція здійснювалась меандром з частотою F_{mod} , глибина модуляції 100%. Резонатор розміщувався в постійному полі електромагніта. Вимірювальне коло складалось зі зразка, джерела живлення та опору навантаження. Зміною напруженості постійного магнітного поля досягались умови спінового резонансу в зразку. При цьому провідність зразка змінювалась (за наявності в ньому спін-залежного каналу протікання струму), що призводило до виникнення в колі змінної складової струму з частотою

тою F_{mod} , яка знімалась з опору навантаження, підсилювалась резонансним підсилювачем та подавалась на синхронний детектор. Напряга на виході синхронного детектора пропорційна зміні струму через зразок в умовах спінового резонансу.

Слід зазначити, що у всіх випадках виміри проводились однією і тією ж вимірювальною установкою, змінювались лише тип резонатора і джерело ВЧ випромінювання.

Результати

Спектри ЕДМР досліджуваного зразка для двох крайніх значень магнітного поля нашої області досліджень зображені на рис. 3.

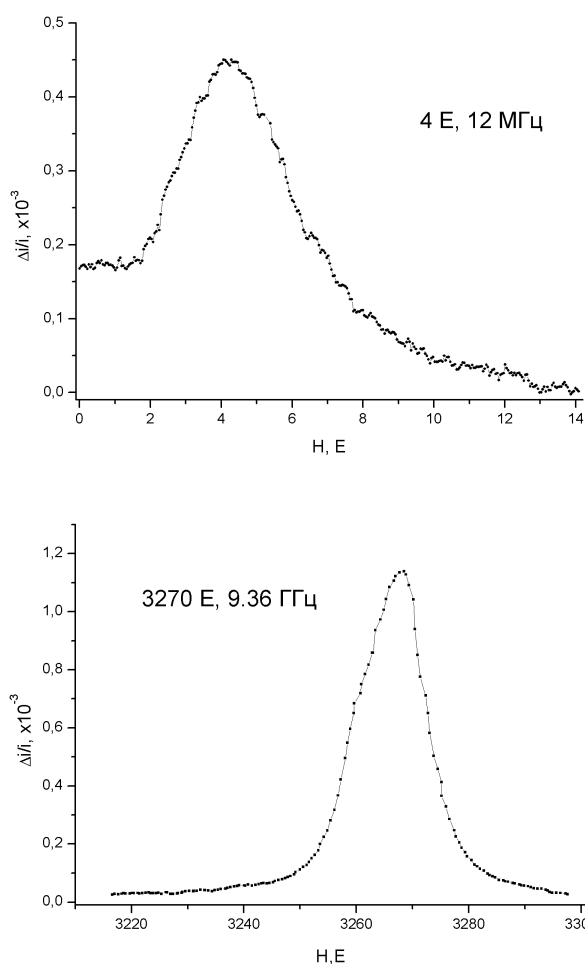


Рис. 3. Спектри ЕДМР досліджуваного зразка в слабких та сильних полях.

Висновки

Отримані результати свідчать про можливість використання одного й того ж зразка в якості безкалібровочного датчика магнітного

поля в широкому діапазоні напруженостей (4 – 3300 Е). Запропонована методика введення парамагнітних центрів дає стабільний і відтворюваний результат. Малі розміри активної зони датчика дозволяють проводити сканування неоднорідних магнітних полів. Подальше вдосконалення методики отримання зразків та реєстрації резонансу відкриває можливості виміру змінних магнітних полів, зокрема, промислової частоти 50 Гц.

Список використаної літератури

- [1]. Yu. V. Afanaciev, N. V. Studentsov, V. N. Horyov, E. N. Chechurina, A. P. Shchelkin. Sredstva izmereniya parametrov magnitnogo polya. Energiya, Leningrad. 320 p. (1979) (*in Russian*).
- [2]. Yu. V. Gorelkinskiy. Izmereniye napryazhennosti silno neodnorodnyh magnitnyh polei metodom EPR. Autoref. dis. kand. tehn. nauk, Leningrad. 24 p. (*in Russian*).
- [3]. O. V. Tretyak, O. I. Kozonushchenko, K. V. Krivokhizha, A. S. Revenko. Spin-dependent current in silicon p-n junction diodes. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 13(1), pp. 95-97 (2010).
- [4]. I. A. Kolomiets, L. S. Mima, V. I. Striha, O. V. Tretiak. Spin-zavisimiy perenos toka v plasticheski deformirovannom kremnii. FTP, 13(3), pp. 427-434 (1979) (*in Russian*).
- [5]. V. A. Kozlov, V. V. Kozlovskiy. Legirovaniye poluprovodnikov radiatsionnymi defectami pri obluchenii protonami i α -chastitsami. FTP, 35(7), pp. 769-795 (2001) (*in Russian*).
- [6]. J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Liimark. The Stopping and Range of Ions in Matter. Pergamon Press, vol. 1, (1985).
- [7]. S. O. Lebed, O. G. Kukharenko, M. G. Tolmachov, O. V. Tretiak. Kyivskiy skanuyuchui yadernyi mikrozonnd z metodykoyu pretsyzijnogo programovanogo oprominenja zrazka mikropuchkom ioniv. Voprosy atomnoi nauki i tehniki, 81(5), (2012) (*in Ukrainian*).

UDC 621.38

Стаття надійшла до редакції 08.06.2016 р.

NEW SILICON MAGNETIC FIELD SENSOR

V. G. Verbitskiy, K. V. Kryvokhizha, O. G. Kukharenko, M. G. Tolmachov, O. V. Tretiak

Institute of high technologies of Taras Shevchenko national university of Kyiv, Glushkova ave. 4-g, 03022, Kyiv, Ukraine, tel. (044) 521-3566, <http://iht.univ.kiev.ua>

Summary

Magnetic field measurements have an important role in science and technology. The existing magnetic field sensors have limited accuracy, require prior calibration, high uniformity of field and works in a narrow range. The effect of the spin-dependent current flow have no these restrictions. But existing devices, based on this effect, have poor reproducibility and low magnitude of the effect. This caused by imperfect and often uncontrolled formation of spin-dependent channel. The method of controlled creation of radiation defects can significantly improve the characteristics of these devices.

The aim of this work is to create a magnetic field sensor based on the effect of the spin-dependent current flow.

Object of study. Planar silicon p-n junction.

Means of treatment. Irradiation of high-energy ions, annealing in vacuum.

Research methods. Electrically detected magnetic resonance.

Results. The resulting sensor allows measuring the magnetic field in a wide range and has good reproducibility.

Conclusions and prospects. The results suggest the possibility of using the same sample as magnetic field sensor in a wide range (4 - 3300 E). The proposed technique of paramagnetic centers creation shows stable and reproducible results. The small size of the sensor active core allows scanning of inhomogeneous magnetic fields. Further development of methods for obtaining samples and resonance registration opens up the possibility of measuring alternating magnetic fields, including industrial frequency of 50 Hz.

Keywords: p-n junction, radiation defects, paramagnetic centers, spin-dependent current, magnetic field sensor

УДК 621.38

НОВИЙ КРЕМНІЄВИЙ ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В. Г. Вербицький, К. В. Кривохижа, О. Г. Кухаренко, М. Г. Толмачов, О. В. Третяк

Інститут високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
просп. Глушкова 4-г, 03022, Київ, Україна, тел. (044) 521-3566, <http://iht.univ.kiev.ua>

Реферат

Вимірювання магнітних полів відіграє важливу роль в науці і техніці. Існуючі датчики магнітного поля мають обмежену точність, вимагають попередньої калібровки, високої однорідності поля, працюють у вузькому діапазоні. Ефект спін-залежного протікання струму цих недоліків позбавлений. Проте існуючі прилади на основі цього ефекту мають слабку відтворюваність і малу величину самого ефекту. Це пояснюється недосконалістю і часто неконтрольованістю утворення спін-залежного каналу протікання струму. Метод контрольованого введення радіаційних дефектів може суттєво покращити характеристики таких приладів.

Метою даної роботи є створення датчика магнітного поля на основі ефекту спін-залежного протікання струму.

Об'єкт дослідження. Кремнієвий планарний p-n перехід.

Методи обробки. Опромінення високоенергетичними іонами, відпал у вакуумі.

Метод дослідження. Електрично детектований магнітний резонанс.

Результати дослідження. Отриманий датчик дозволяє вимірювати напруженість магнітного поля в широкому діапазоні та має добру відтворюваність.

Висновки та перспективи. Отримані результати свідчать про можливість використання одного й того ж зразка в якості безкалібровочного датчика магнітного поля в широкому діапазоні напруженостей (4 – 3300 E). Запропонована методика введення парамагнітних центрів дає стабільний і відтворюваний результат. Малі розміри активної зони датчика дозволяють проводити сканування неоднорідних магнітних полів. Подальше вдосконалення методики отримання зразків та реєстрації резонансу відкриває можливості виміру змінних магнітних полів, зокрема, промислової частоти 50 Гц.

Ключові слова: p-n перехід, радіаційні дефекти, парамагнітні центри, спін-залежний струм, датчик магнітного поля