

## МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

В даній роботі розглянуто два методи вимірювання імпульсного магнітного поля: на основі В-точок індукційної катушки та Ферозондового датчика.

Для вимірювання слабких магнітних полів були використані методи на основі ефекта Холла магніторезисторних конфігурацій.

Подано зображення трансмісійної електронної мікроскопії плівок  $La_{0,8}Sr_{0,2}Mn_{1,06}Co_{0,14}O_3$  (LSMCO), легованих Co, а також плівок, що не містять Co,  $La_{0,8}Sr_{0,2}Mn_{1,10}O_3$  (LSM(1,10)O) та  $La_{0,8}Sr_{0,2}Mn_{1,15}O_3$  (LSM(1,15)O) та їх залежності питомого опору від температури.

**Ключові слова:** магнітоопір; манганітні плівки; імпульсне магнітне поле; датчики магнітного поля; система вимірювання магнітного поля

### **Abstract**

In this work, two methods of measuring the pulsed magnetic field are considered: based on the B-points of the induction coil and the Ferroprobe sensor.

Methods based on the Hall effect of magnetoresistive configurations were used to measure weak magnetic fields.

Transmission electron microscopy images of Co-doped  $La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{1.06}Co_{0.14}O_3$  (LSMCO) and Co-free films,  $La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{1.10}O_3$  (LSM(1,10)O) and  $La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{1.15}O_3$  (LSM(1,15)O) and their dependence of specific resistance on temperature.

**Key words:** magnetic resistance; manganite films; pulsed magnetic field; magnetic field sensors; magnetic field measurement system

### **Вступ**

В останні роки імпульсні магнітні поля знайшли широке застосування в різних галузях науки і промисловості. Для вимірювання цих магнітних полів використовується декілька методів, які залежать від напруженості магнітного поля, однорідності та зміни його з часом, а також необхідної точності.

Доступні методи вимірювання в технології імпульсного магнітного поля можна розділити на два типи. Перший отримує сигнал, пропорційний похідній за часом магнітних полів,  $dB/dt$ . Перевагою цього методу є висока напруга на виході датчика, оскільки звичайне імпульсне поле має високу  $dB/dt$  (10 000 Т/с) через коротку тривалість імпульсу та високу амплітуду магнітного поля.

Незважаючи на те, що це найстаріший метод (датчик В-точок, індукційна котушка), сьогодні він широко використовується в таких додатках, як наука про плазму (тороїдальна машина RFX-mod2) [1], для магнітів прискорювачів елементарних частинок, систем койлган і рейлган та інших полів [2,3].

Іншим типом датчика, який також працює практично за тим же принципом, є феррозондовий датчик. Останнім часом було досягнуто значного прогресу в точності вимірювань цього типу датчиків і в покращенні відношення сигнал/шум [4]. Залежно від області застосування такі сенсори можуть бути як великих розмірів (близько 50 мм для детектування серцевої діяльності [5]), так і мініатюрних. Мініатюрні датчики виготовляються за технологією РСВ, що дозволяє створювати датчики розміром у кілька десятків міліметрів [6]. Однак, оскільки вимірний сигнал у цьому випадку пропорційний похідній магнітного імпульсу, щоб отримати реальну форму магнітного імпульсу, сигнал потрібно інтегрувати. Це призводить до накопичення помилок протягом усього періоду інтегрування [7]. Інші методи вимірювання

базуються на ефекті Холла [8] і кількох ефектах магніторезистивності, таких як анізотропний магнітоопір (AMR), гігантський магнітоопір (GMR) і тунельний магнітоопір (TMR) [9–11]. Вихідний сигнал цих датчиків безпосередньо представляє величину магнітного поля; однак великий  $dB/dt$  у цьому випадку є недоліком, оскільки він викликає шум підйому, і стає важко отримати відповідні експериментальні дані. Однак найчастіше датчики такого типу використовуються для вимірювання слабких магнітних полів, оскільки поле насичення знаходиться нижче діапазону мілітесла [11–13]. Крім того, всі ці методи мають один спільний недолік: вони чутливі до напрямку магнітного поля. Це означає, що напрямок магнітного поля має бути відомий заздалегідь і він не повинен змінюватися під час вимірювання. Цю проблему можна вирішити за допомогою трьох ортогонально розташованих датчиків [4,14], які дозволяють вимірювати не тільки величину, але й напрямок магнітного поля. Це особливо важливо в певних промислових, медичних, робототехнічних додатках або програмах віртуальної реальності. Тривимірний датчик магнітного поля на основі одного спіно-орбітального крутного пристрою [15], тривимірний магнітометр на основі простого пристрою Холла в планарній геометрії [14,16] або тривісний індукційний датчик [17]. Можна використовувати для цієї мети. Однак таке рішення добре підходить для вимірювання відносно довгоїмпульсних магнітних полів. Для вимірювання коротких імпульсів збільшення кількості проводів для живлення датчиків разом із ефектом індукованої напруги в цих проводах, викликані електрорушійною силою, сильно збільшує похибку вимірювання. Крім того, використання 3D-дизайну робить установки громіздкими з відносно великими розмірами, що створює проблеми під час вимірювання локально або в дуже малих обсягах. Тим часом для багатьох застосувань імпульсного поля основним параметром є величина магнітного поля. Напрямок можна визначити за допомогою додаткового анізотропного датчика.

Нещодавно було продемонстровано, що високоамплітудні імпульсні магнітні поля можуть бути виміряно за допомогою нових GMR-B-скалярних датчиків, заснованих на ефекті гігантського магнітоопору (GMR) полікристалічних наноструктурованих манганітових (La-Sr-Mn-O) плівок [18–20]. Ці датчики можуть вимірювати імпульсні магнітні поля високої величини тривалістю мілісекунди в дуже малих обсягах. У [19] було зроблено висновок, що диференціальні B-точкові датчики, які мають спрямований відгук, можуть бути замінені датчиками CMR, які є життєздатними для рельсотронів, де не потрібна спрямованість. Перевага цих датчиків полягає в тому, що вони вимірюють магнітне поле незалежно від напрямку, що дозволяє легше встановити їх у вимірювальну позицію, оскільки не вимагає точної орієнтації датчика щодо напрямку магнітного поля. Скалярні датчики CMR-B використовувалися для вимірювання розподілу магнітного поля та процесів магнітної дифузії в рельсотронах [18, 19], розподілу дуже неоднорідних перехідних магнітних полів під час експериментів з котушками та магнітних полів неруйнівної подвійної котушки. магніти імпульсного поля до мегагауса [20]. Проте всі ці датчики використовувалися для вимірювання довгоїмпульсних магнітних полів (зазвичай понад 1 мс) [18,20,21]. При такій тривалості імпульсу ефект пам'яті та індукована напруга в лінії передачі сигналу незначно впливають на точність вимірювання.

Іншим важливим параметром для датчиків магнітного поля є величина магнітоопору при різних температурах. Показано, що збільшення надлишку Mn, тобто зростання відношення  $Mn/(La + Sr) > 1$ , зміщує температуру переходу ізолятор-метал  $T_m$  у більш високотемпературну область і, як наслідок, призводить до вищої значення магнітоопору при температурах вище 320 K [22]. Тому однією з цілей даної роботи було вивчення можливості використання манганітних плівок для вимірювання короткоїмпульсних магнітних полів при низьких і високих температурах. Для цих цілей були обрані плівки манганітів, легованих Co, і плівки з надлишком Mn.

Ще однією проблемою, яку необхідно вирішити для вимірювання короткоїмпульсних магнітних полів, є сигнал високої електрорушійної сили (ЕРС), який з'являється в лінії передачі датчика через швидку зміну магнітного поля. Вита пара або додаткова компенсаційна петля [23]

можуть частково вирішити цю проблему. Крім того, внесок ЕМП можна вирахувати шляхом пульсації поля в позитивному та негативному напрямках і подальшої обробки даних [24]. Однак цей метод неможливий, якщо експерименти не можна повторити в тих самих умовах. Інші методи віднімання ЕРС включають використання джерела змінного струму для датчика. Наприклад, змінний струм 10 кГц використовувався для модуляції живлення датчика Холла для корекції вихідної напруги [25]. Однак для вимірювання імпульсів магнітного поля з високою амплітудою та мікросекундною тривалістю цей метод стає складним через обмеження тимчасової роздільної здатності та проблеми синхронізації під час запису сигналу, коли напруга має синусоїдальну форму.

У роботі [26] представлені результати дослідження магнітоопору та релаксації опору плівок  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{1-y}\text{Co}_y)_z\text{O}_3$ , які можуть бути використані для виготовлення магнітних сенсорів. Запропоновано вимірювач магнітного поля, який здатний вимірювати сильноімпульсні магнітні поля з тривалістю імпульсу кілька мікросекунд.

Зображення поперечного перерізу трансмесійної електронної мікроскопії (ТЕМ) із малим збільшенням плівок із різними композиціями показано на рисунку 1. Як видно, плівки складаються з стовпчиків кристалітів, які поширені по всій товщині плівки з їхньою довгою віссю, розташованою перпендикулярно до підкладки. Однак принципової різниці між плівками з різним хімічним складом не спостерігається. Дослідження структури вирощеної плівки за допомогою XRD (не представлено) також показало лише характерні піки, пов'язані з підкладкою  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і полікристалічними плівками LSMO або LSMCO з перовскітоподібною кристалічною структурою.

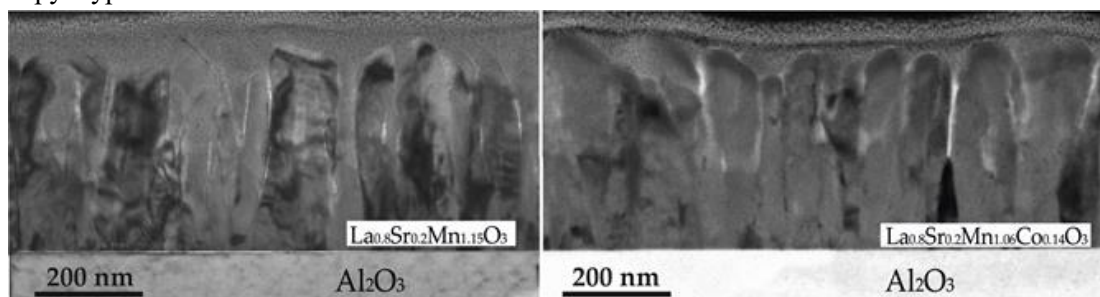


Рисунок 1. ТЕМ зображення плівки різного хімічного складу.

Залежності питомого опору від температури для плівок  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,06}\text{Co}_{0,14}\text{O}_3$  (LSMCO), легованих Co, а також плівок, що не містять Co,  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,10}\text{O}_3$  (LSM(1,10)O) та  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,15}\text{O}_3$  (LSM(1,15)O) представлено на рис. 2. Можна побачити, що плівки з вмістом Co мають максимум питомого опору ( $\rho_m$ )  $2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при температурі переходу ізолятор–метал  $T_m = 180 \text{ К}$ , тоді як  $T_m$  плівок без Co зсувається в область вищих температур:  $250 \text{ К}$  і  $275 \text{ К}$  для плівок з  $\text{Mn}/(\text{La} + \text{Sr}) = 1,1$  і  $1,15$  відповідно. Водночас максимум питомого опору цих плівок зменшується:  $0,36 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  та  $0,25 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  відповідно.

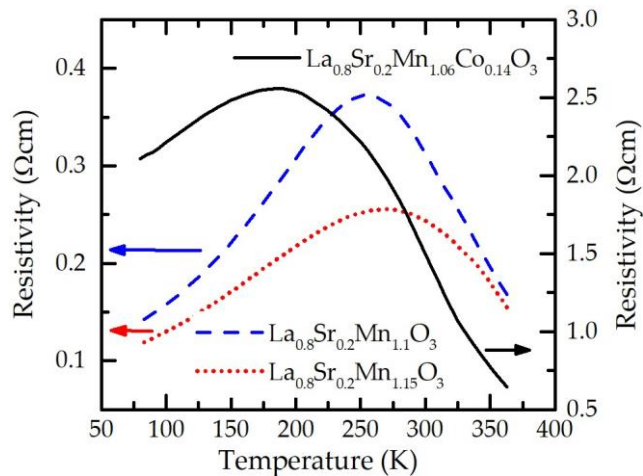


Рисунок 2. Залежності питомого опору від температури плівок LSMO та LSMCO з різним вмістом Mn та Co.

### Висновки

В данній роботі розглянуто два методи вимірювання імпульсного магнітного поля: на основі В-точок індукційної катушки та Ферозондового датчика.

Для вимірювання слабких магнітних полів були використані методи на основі ефекта Холла магніторезисторних конфігурацій.

Подано зображення трансмісійної електронної мікроскопії плівок  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,06}\text{Co}_{0,14}\text{O}_3$  (LSMCO), легованих Co, а також плівок, що не містять Co,  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,1}\text{O}_3$  (LSM(1,10)O) та  $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,15}\text{O}_3$  (LSM(1,15)O) та їх залежності питомого опору від температури. Показано, що плівки з вмістом Co мають максимум питомого опору ( $\rho_m$ ) 2,5 Ом·см при температурі переходу ізолятор–метал  $T_m = 180$  К, тоді як  $T_m$  плівок без Co зсувається в область вищих температур: 250 К і 275 К для плівок з  $\text{Mn}/(\text{La} + \text{Sr}) = 1,1$  і 1,15 відповідно. Водночас максимум питомого опору цих плівок зменшується: 0,36 Ом·см та 0,25 Ом·см відповідно.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Abate, D.; Cavazzana, R. Effective Area Measurements of Magnetic Pick-Up Coil Sensors for RFX-mod2. *Sensors* **2022**, *22*, 9767. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Coupland, J.H.; Randle, T.C.; Watson, M.J. A magnetic spectrometer with gradient field. *IEEE Trans. Magn.* **1981**, *17*, 1851–1854. [[CrossRef](#)]
3. Tumanski, S. Induction coil sensors—A review. *Meas. Sci. Technol.* **2007**, *18*, R31–R46. [[CrossRef](#)]
4. Wei, S.; Liao, X.; Zhang, H.; Pang, J.; Zhou, Y. Recent Progress of Fluxgate Magnetic Sensors: Basic Research and Application. *Sensors* **2021**, *21*, 1500. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Cho, H.-S.; Yang, J.-H.; Lee, S.-Y.; Lee, J.-W.; Lee, J.-H. Wearable Fabric Loop Sensor Based on Magnetic-Field-Induced Conductivity for Simultaneous Detection of Cardiac Activity and Respiration Signals. *Sensors* **2022**, *22*, 9884. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Marconato, N. Design of Integrated Micro-Fluxgate Magnetic Sensors: Advantages and Challenges of Numerical Analyses. *Sensors* **2022**, *22*, 961. [[CrossRef](#)]
7. Hosozawa, A.; Sekiguchi, J.; Asai, T.; Takahashi, T. Application of a Hall sensor for pulsed magnetic field measurement in the FAT-CM FRC experiments. *Rev. Sci. Instr.* **2018**, *89*, 10J12. [[CrossRef](#)]
8. Kawahito, S.; Choi, S.O.; Ishida, M.; Nakamura, T. Micromachined Hall elements for two-dimensional magnetic-field sensing. *Sens. Actuators A Phys.* **1994**, *40*, 141–146. [[CrossRef](#)]
9. Lenz, J.; Edelstein, A.S. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sens. J.* **2006**, *6*, 631–649. [[CrossRef](#)]
10. Jogschies, L.; Klaas, D.; Kruppe, R.; Rittinger, J.; Taptimthong, P.; Wienecke, A.; Rissing, L.; Wurz, M.C. Recent developments of magnetoresistive sensors for industrial applications. *Sensors* **2015**, *15*, 28665–28689. [[CrossRef](#)]
11. Khan, M.A.; Sun, J.; Li, B.; Przybysz, A.; Kosel, J. Magnetic sensors-A review and recent technologies. *Eng. Res. Express* **2021**, 3, 02200. [[CrossRef](#)]
12. Murzin, D.; Mapps, D.J.; Levada, K.; Belyaev, V.; Omelyanchik, A.; Panina, L.; Rodionova, V. Ultrasensitive Magnetic Field Sensors for Biomedical Applications. *Sensors* **2020**, *20*, 1569.

- [CrossRef]
13. Zheng, C.; Zhu, K.; de Freitas, S.C.; Chang, J.-Y.; Davies, J.E.; Eames, P.; Freitas, P.P.; Kazakova, O.; Kim, C.; Leung, C.-W.; et al. Magnetoresistive sensor development roadmap (non-recording applications). *IEEE Trans. Magn.* **2019**, *55*, 0800130. [CrossRef]
  14. Tang, W.; Lyu, F.; Wang, D.; Pan, H. A new design of a single-device 3d Hall sensor: Cross-shaped 3D Hall sensor. *Sensors* **2018**, *18*, 1065. [CrossRef]
  15. Li, R.; Zhang, S.; Luo, S.; Guo, Z.; Xu, Y.; Ouyang, J.; Song, M.; Zou, Q.; Xi, L.; Yang, X.; et al. A spin-orbit torque device for sensing three-dimensional magnetic fields. *Nat. Electron.* **2021**, *4*, 179–184. [CrossRef]
  16. Shioyai, J.; Fujiwara, K.; Nojima, T.; Tsukazaki, A. Three-dimensional sensing of the magnetic-field vector by a compact planar-type Hall device. *Commun. Mater.* **2021**, *2*, 102. [CrossRef]
  17. Alfadhel, A.; Carreno, A.A.A.; Foulds, I.G.; Kosel, J. Three-Axis Magnetic Field Induction Sensor Realized on Buckled Cantilever Plate. *IEEE Trans. Magn.* **2013**, *49*, 4144–4147. [CrossRef]
  18. Stankevič, T.; Medišauskas, L.; Stankevič, V.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Liebfried, O.; Schneider, M. Pulsed magnetic field measurement system based on colossal magnetoresistance-B-scalar sensors for railgun investigation. *Rev. Sci. Instrum.* **2014**, *85*, 044704. [CrossRef]
  19. Haran, T.L.; Hoffman, R.B.; Lane, S.E. Diagnostic capabilities for electromagnetic railguns. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2013**, *41*, 1526–1532. [CrossRef]
  20. Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Keršulis, S.; Plaušinitienė, V.; Abrutis, A.; Zherlitsyn, S.; Herrmannsdörfer, T.; Wosnitza, J.; Wolff-Fabris, F. Nanostructured thin manganese films in megagauss magnetic field. *Appl. Phys. Lett.* **2012**, *101*, 092407. [CrossRef]
  21. Žurauskienė, N.; Pavilonis, D.; Klimantavicius, J.; Balevičius, S.; Stankevič, V.; Vasiliauskas, R.; Plaušinitienė, V.; Abrutis, A.; Skapas, M.; Juškenas, R. Magnetoresistance relaxation anisotropy of nanostructured La-Sr(Ca)-Mn-O films induced by high-pulsed magnetic fields. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2017**, *45*, 2773–2779. [CrossRef]
  22. Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Keršulis, S.; Klimantavicius, J.; Simkevicius, C.; Plausinaitienė, V.; Vagner, M.; Balevičius, S. Increase of operating temperature of magnetic field sensors based on La-Sr-Mn-O films with Mn excess. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2019**, *47*, 4530–4535. [CrossRef]
  23. Balevičius, S.; Žurauskienė, Z.; Stankevič, V.; Stankevič, T.; Novickij, J.; Schneider, M. High-Frequency CMR-B-Scalar Sensor for Pulsed Magnetic Field Measurement. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2013**, *41*, 2885–2889. [CrossRef]
  24. Mironov, O.A.; Zherlitsyn, S.; Uhlarz, M.; Skoursli, Y.; Palewski, T.; Wosnitza, J. Micro-miniature Hall probes for applications at pulsed magnetic fields up to 87 Tesla. *J. Low Temp. Phys.* **2010**, *159*, 315–318. [CrossRef]
  25. Imamura, H.; Uchida, K.; Ohmichi, E.; Osada, T. Magnetotransport measurements of low dimensional conductors under pulsed ultra-high magnetic fields. *J. Phys. Conf. Ser.* **2006**, *51*, 303–306. [CrossRef]
  26. Stankevič, V.; Keršulis, S.; Dilys, J.; Bleizgys, V.; Viliūnas, M.; Vertelis, V.; Maneikis, A.; Rudokas, V.; Plaušinitienė, V.; Žurauskienė, N. Measurement System for Short-Pulsed Magnetic Fields. *Sensors* **2023**, *23*, 1435. <https://doi.org/10.3390/s23031435>

*Галина Іванівна Мартинюк* – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [martunyuk@gmail.com](mailto:martunyuk@gmail.com)

*Олександр Володимирович Осадчук* - д. т. н., проф., зав. кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)

*Осадчук Володимир Степанович* — д-р техн. наук, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [osadchuk.vs38@gmail.com](mailto:osadchuk.vs38@gmail.com)

*Galina I. Martyniuk* — Postgraduate Student, Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, [martunyuk@gmail.com](mailto:martunyuk@gmail.com)

*Alexander V. Osadchuk* — Dr. Sc. (Eng.), prof., Head of Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, [osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)

*Volodymyr S. Osadchuk* — Dr. Sc. (Eng.), Prof., Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnitsa National Technical University, [osadchuk.vs38@gmail.com](mailto:osadchuk.vs38@gmail.com)