

## АНОТАЦІЯ

Полинчук П. Ю. Безрелаксаційне перемикання комірок магнітної пам'яті на основі багатошарових наносистем з антиферромагнітним зв'язком. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. – Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Київ, 2024.

У дисертаційній роботі досліджена динаміка намагніченості елементів магнітної пам'яті у двох важливих для практичної реалізації випадках: 1) під дією магнітного поля; 2) із застосуванням комбінованого впливу імпульсів магнітного поля та спін-поляризованого струму. З'ясовано умови перемагнічування синтетичного антиферромагнетика (САФ) або комірки пам'яті під дією цих зовнішніх збурень. Запропоновано такі принципи керування, що забезпечують перемагнічування вільного шару комірки пам'яті під впливом імпульсів магнітного поля та спін-поляризованого струму. Отримані результати є важливими для технологічних застосувань в пристроях магнітної пам'яті з довільним доступом (MRAM).

У *вступі* до оригінальної частини дисертації обґрунтовано актуальність її теми. Сформульовано мету, визначено об'єкт та предмет дослідження. Обґрунтовано новизну отриманих результатів. Надається інформація щодо апробації результатів досліджень на наукових конференціях.

У *першому розділі* дисертаційної роботи проведено аналіз сучасного стану проблеми перемагнічування синтетичного антиферромагнетика з метою запису інформації. Розглянуто фізичні основи методів, які застосовуються для перемикання магнітних станів комірки пам'яті в застосуваннях MRAM.

У *другому розділі* дисертаційної роботи визначено умови реалізації швидкого перемикання напрямку намагніченості комірки пам'яті під дією імпульсу магнітного поля, прикладеного перпендикулярно до площини вільного шару САФ. Зроблено оцінки амплітуди та тривалості імпульсів лазерного випромінювання необхідних для керування станами намагніченості САФ. Показано, що в разі реалізації швидкісного режиму перемагнічування комірки пам'яті, індукована лазером пульсація магнітного поля може бути покладена в основу сучасного методу запису інформації на носії типу САФ.

Крім того, у *другому розділі* дисертаційної роботи досліджено зміну магнітного стану синтетичного антиферромагнетика під впливом спін-

поляризованого струму. Визначено вплив початкового кута, між “поляризатором” спін-поляризованого струму та намагніченістю САФ на амплітуду та тривалість струмового імпульсу, необхідних для перемагнічування елементів пам’яті.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи теоретично досліджено процес керування намагніченістю комірки пам’яті під впливом комбінованої дії локальних зовнішніх магнітних полів, які створюються шляхом пропускання наперед запрограмованих електричних струмів через керуючі електричні провідники в стандартній компоновці. Показано, що за рахунок оптимізації форми та тривалості струмових імпульсів  $I(t)$  ( $t$  – час) досягається швидкісний безрелаксаційний режим перемикавання магнітного стану комірки пам’яті. Визначено оптимальні параметри польових (струмових) імпульсів для досягнення швидкого безрелаксаційного режиму перемагнічування комірки пам’яті.

У *четвертому розділі* дисертаційної роботи теоретично досліджено практично важливу для спінтроники задачу – проблему керування магнітними станами комірки пам’яті MRAM під впливом комбінованої дії локальних зовнішніх магнітних полів і спін-поляризованих струмів. Досліджено перемагнічування комірки пам’яті, що складається з трьох наношарів, розділених двома тунельними магнітними переходами, під впливом комбінованої дії спін-поляризованого струму та імпульсів магнітного поля. З’ясовано динаміку намагніченості “рухомого” ферромагнітного шару. Аналітично обчислено оптимальні амплітуди та часи тривання імпульсу спін-поляризованого струму та індукованого ним магнітного поля, необхідні для досягнення стійкого, швидкого, безрелаксаційного перемагнічування комірки пам’яті.

**Ключові слова:** синтетичний антиферромагнетик, спін-поляризований струм, магнітна комірка пам’яті, магнітний тунельний перехід, низькобар’єрне перемагнічування, безрелаксаційне перемагнічування, магнітна динаміка.

## ABSTRACT

Polynchuk P.Yu. Relaxation-free switching of magnetic memory cells based on multilayer nanosystems with antiferromagnetic coupling. – Qualification research paper on the rights of a manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy scientific degree in the Speciality 104 – Physics and Astronomy. – Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dynamics of magnetization of magnetic memory elements in two cases important for practical implementation is studied in this thesis: 1) under the influence of a magnetic field; 2) with the combined effect of magnetic field pulses and pulses of spin-polarized current. The conditions for magnetization reversal of the synthetic antiferromagnet (SAF) or a memory cell under the influence of these external perturbations are determined. The following control principles are proposed to ensure the magnetization of the free layer of the memory cell under the influence of magnetic field pulses and spin-polarized current. The results obtained are important for technological applications in random access magnetic memory (MRAM) devices.

*In the introduction* to the original part of the dissertation, the relevance of its topic is proved. The purpose is formulated, the object and subject of the study are defined. The novelty of the results is substantiated. Information on the testing of research results at scientific conferences is provided.

*The first chapter* of the thesis analyses the current state of the problem of remagnetization of synthetic antiferromagnets for the purpose of recording information. The physical basis of the methods used to switch the magnetic states of a memory cell in MRAM applications is described.

*In the second chapter* of the thesis, the conditions for the implementation of rapid switching of the magnetization direction of the memory cell under the action of a magnetic field pulse applied perpendicularly to the plane of the free layer of the SAF are defined. The amplitude and duration of laser radiation pulses required to control the magnetization states of the SAF are estimated. It is shown that in the case of implementation of the high-speed mode of SAF magnetization reversal, the laser-induced magnetic field pulsation can be the basis of a modern method of recording information on SAF-type media.

In addition, *the second chapter* of the thesis investigates the change in the magnetic state of a synthetic antiferromagnet under the influence of a spin-polarized current. The influence of the initial angle between the spin-polarized current “polarizer” and the

magnetization of the SAF on the amplitude and duration of the current pulse required to remagnetize the memory elements is determined.

The *third chapter* of the thesis theoretically investigates the process of controlling the magnetization of a memory cell under the combined effect of local external magnetic fields, which are created by passing pre-programmed electric currents through control electric in a standart layout. It is shown that by optimizing the shape and duration of current pulses  $I(t)$  ( $t$  – time), a high-speed relaxation-free mode of switching the magnetic state of the memory cell is achieved. The optimal parameters of field (current) pulses for achieving a fast relaxation-free mode of memory cell magnetization are determined.

*In the fourth chapter* of the thesis, we have theoretically studied a practically important task for spintronics – the problem of controlling the magnetization states of a magnetic memory cell by means of the combined action of local external magnetic fields and spin-polarized currents. The magnetization of a memory cell consisting of three nanolayers separated by two tunnel magnetic junctions under the combined action of a spin-polarized current and magnetic field pulses is investigated. The dynamics of magnetization of the free ferromagnetic layer is studied. The optimum amplitudes and durations of the spin-polarized current pulse and the magnetic field induced by it are analytically calculated to achieve stable, fast, relaxation-free remagnetization of the memory cell.

**Key words:** synthetic antiferromagnet, spin-polarized current, magnetic memory cell, magnetic tunnel junction, low-barrier magnetization reversal, inertial-free magnetization reversal, magnetic dynamics.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ (PUBLICATION LIST)

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (Publications representing main thesis results):

1. Yu. I. Dzhezherya, P. Yu. Polynchuk, I. V. Gerasimchuk, S. P. Kruchinin, V. M. Kalita and V. Korenivski, Control of the Memory Cell Magnetization by a Combined Pulse of Local Magnetic Fields, *Modern Physics Letters B*, V. 38, 2440001 (2024). <https://doi.org/10.1142/S0217984924400013>. (Q3)
2. Y. Dzhezherya, P. Polynchuk, A. Kravets and V. Korenivski, Ultrafast inertia-free switching of double magnetic tunnel junctions, *IEEE Transactions on Magnetics*, V. 60, 4400106 (2024). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2024.3380467>. (Q2)
3. Yu. Dzhezherya, V. Kalita, P. Polynchuk, A. Kravets, V. Korenivski, S. Kruchinin, S. Bellucci, Fast barrier-free switching in synthetic antiferromagnets, препринт <http://arxiv.org/abs/2110.02138>.

### Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (Conference abstracts and proceedings):

1. Liedienov N. A., Polynchuk P. Yu., Pashchenko A. V., Dzhezherya Yu. I., Levchenko G. G. / Structural and magnetic properties of lanthanum-strontium manganite nanopowder // Abstract Book of the International research and practice conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2022, Lviv). – August 25-27, 2022. – P. 46.
2. Dzhezherya Yu. I., Kravets A. F., Kalita V. M., Polynchuk P. Yu., Korenivski V. / Magnetisation switching of a synthetic antiferromagnet by a magnetic field pulse // Abstract Book of the International research and practice conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2023, Bukovel). – August 16-19, 2023. – P. 33.
3. Джежеря Ю. І., Полинчук П. Ю., Герасимчук І. В., Кравець А. Ф. / Керування намагніченістю комірки пам'яті комбінованими імпульсами локальних магнітних полів // Тези доповідей IV конференції молодих вчених “Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології” (СММТ-2023, Київ). – Жовтень 5-6, 2023. – С. 8.
4. Dzhezherya Yu., Polynchuk P., Kravets A. and Korenivski V. / Ultrafast inertia-free switching of double magnetic tunnel junctions // Proceedings of the XI-th International Conference “Topical problems of semiconductors physics”. – May 27-31, 2024. – P. 19.