

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА
ІНСТИТУТ «ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ»
КАФЕДРА МАТЕРІАЛІВ РЕАКТОРОБУДУВАННЯ ТА ФІЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проєкту (роботи)

БАКАЛАВРА

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

укр. Скірміони як ключовий елемент перспективної енергонезалежної пам'яті,
математичне моделювання логічних вузлів (комірок)

англ. Skymions as a key element of promising non-volatile memory,
mathematical modeling of logic nodes

Виконав(ла): студент 4 курсу навчання

за ОПП бакалавр

спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

освітня програма: Прикладна фізика

(назва)

КАВУН Ростислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(особистий підпис)

Керівник к.ф.-м.н., ст.н.с.

БОГАТИРЕНКО Сергій Іванович

(особистий підпис)

Рецензент доцент кафедри експериментальної фізики
фізичного факультету, канд. фіз.-мат. наук

Володимир СУХОВ

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

ЗМІСТ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА.....	1
ЗМІСТ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	3
АВСТРАСТ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. БІГОВА ПАМ'ЯТЬ. КОНСТРУКЦІЯ, ВІДОМОСТІ ТА БАЗОВІ ПРИНЦИПИ	9
РОЗДІЛ 2. СКІРМІОН. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ. ВИКОРИСТАННЯ У ТРЕКОВІЙ ПАМ'ЯТІ ТА ЛОГІЧНИХ ВУЗЛАХ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ.....	14
ВИСНОВОК.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена вивченню однієї з перспективних технологій зберігання даних, яка має великий потенціал стати на заміну сучасним промисловим зразкам сховищ даних, а саме – бігової пам'яті.

Для позначення цієї галузі знань, дослідники та промисловці використовують термін спітроніка. Цим поняттям позначають теоретичні обчислювальні системи і системи зберігання, які використовують квантову властивість, відому як «спін», магнітну орієнтацію електрона чи іншої субатомної частинки.

Робота розкриває основні відомості про новітні напрямки досліджень у цій галузі, наводить теоретичні та математичні пояснення фундаментальним поняттям спітроніки та наводить приклади практичної реалізації та використання даних технологій. Також розглядається проблематика розробки промислових зразків бігової пам'яті та напрямки досліджень для подолання існуючих перешкод.

Проведено критичний аналіз літературних джерел, що пов'язані із новітніми дослідженнями по темі розробки та моделювання сучасних зразків магнітної пам'яті. На основі отриманих знань визначено перспективи розвитку даної галузі науки, наведено приклади використання магнітних частинок для кодування інформації, і побудови на їх основі логічних воріт для використання не лише як сховищ зберігання даних, а й для обчислювальної техніки.

Також наведено приклади використання магнітних частинок для кодування інформації, і побудови на їх основі логічних воріт для використання не лише як сховищ зберігання даних, а й для обчислювальної техніки.

Виконана комп'ютерна симуляція процесів спінтроники, що є важливим та новітнім методом вивчення у цій галузі знань, і дозволяє проводити розрахунки руху магнітних частинок.

ABSTRACT

This work is devoted to the study of one of the promising data storage technologies, which has great potential to replace modern industrial samples of general data, namely, running memory.

To denote this field of knowledge, researchers and industrialists use the term peripheral electronics. This term refers to theoretical computing systems and storage that select a quantum property known as "spin," the magnetic orientation of an electron or other subatomic part.

The work discloses basic information about the latest directions of research in this field, provides theoretical and mathematical explanations of the fundamental concepts of spintronics, and provides examples of practical implementation and use of this technology. The problems of developing industrial samples of running memory and directions of research to overcome existing obstacles are also considered.

A critical analysis of literary sources related to the latest research on the development and modeling of modern samples of magnetic memory is carried out. On the basis of the knowledge obtained, the prospects for the development of this field of science are determined, examples of the use of magnetic parts for encoding information, and the construction of logical inversions based on them for use not only as data storage facilities, but also for computing equipment are given.

There are also examples of using magnetic parts to encode information, and building logic circuits based on them for use not only as data storage, but also for computing.

A computer simulation of spintronics processes, which is a production and the newest method of study in this field of knowledge, was performed, and allows calculations of the movement of magnetic parts.

ВСТУП

Комп'ютерна техніка стала одним з основних рушіїв прогресу для всього людства і наразі використовується в усіх без виключення сферах діяльності: документообіг, державне управління, економіка, освіта, тощо.

Безсумнівно, що створена периферія не здатна належно функціонувати без наявності сховища даних, простіше кажучи, – пам'яті. Вона має кілька важливих характеристик, які є визначальними для забезпечення високої якості роботи:

- 1) Об'єм даних
- 2) Швидкість зчитування та запису
- 3) Довговічність
- 4) Стійкість до факторів зовнішнього впливу (Таких як джерела намагнічування, пил, або інші забруднення і тому подібне)

Наразі у комп'ютерній техніці використовується декілька видів накопичувачів:

- 1) HDD – hard (magnetic) disk drive. Жорсткі диски. Пристрої випадкового доступу (random access), засновані на принципі магнітного запису. Носієм інформації є диски, покриті шаром феромагнітного матеріалу, частіше зв'язані з діоксиду хрому.

Основним недоліком є швидкість запису та зчитування даних, що є вже частково недостатньою для сучасних потреб користувачів. Тому використовуються більше у бюджетній техніці, або у серверах, де важливе збереження даних у дуже великих об'ємах.

- 2) SSD – solid state drive. Твердотільний накопичувач. Немеханічний пристрій зберігання інформації на основі мікросхем пам'яті. Є варіанти

пристроїв як на базі флеш-пам'яті, так і на основі DRAM (dynamic random access memory). Окрім мікросхем пам'яті такі накопичувачі мають ще управляючу мікросхему – контролер.

Основний недолік такого пристрою – обмежена кількість циклів запису інформації у порівнянні із жорсткими дисками, та більша ціна за одиницю об'єму пам'яті. Але такий тип накопичувача є більш стійким до зовнішніх пошкоджень[3]

Магнітні жорсткі диски (HDD) були основним сховищем для зберігання цифрових даних протягом більш ніж 50 років. Недавно ємність усіх накопичувачів на магнітних дисках перевищила ємність аналогових пристроїв для зберігання даних – таких, що зберігають інформацію не у вигляді двійкового сигналу. Найпростіші приклади: плівка, вініл, тощо. Цей факт у деяких джерелах називають «початком цифрової епохи».[3]

Технологія магнітного жорсткого диску двовимірною, а цифрові дані зберігаються як напрямок намагніченості крихітних областей на тонкому магнітному покритті на поверхні диску. Запис і зчитування біту інформації відбувається шляхом перемагнічування доменів записуючою голівкою, яка розташована дуже близько до поверхні диска.

За останні 50 років площа одного магнітного біта зменшилась приблизно на 9 порядків, завдяки винайденому ефекту гігантського магнітного опору, і зараз є настільки малою, що вдосконалення вже наявної технології для пошуку, читання і запису бітів, стикаються з перепорою у вигляді фундаментальних меж, які долати занадто важко, або недоцільно дорого.[1]

Серед альтернатив, запропонованих на зміну жорстким дискам, є технологія «бігової пам'яті» (трекової пам'яті – racetrack memory). Вона має високі перспективи на реалізацію та розвиток, враховуючи останні досягнення у фундаментальній фізиці та матеріалознавстві.

Одна з багатьох назв цієї технології – твердотільна спінтронна пам'ять. На відміну від магнітних дисків – не має рухомих частин. Також вона може бути виконана як тривимірний пристрій, на відміну від більшості технологій магнітного запису даних. Крім того, вважається, що даний вид пам'ятці споживатиме значно менше енергії навіть у порівнянні з твердотільними накопичувачами (SSD).

Використання носіїв пам'яті такого формату поєднує у собі переваги уже існуючих типів носіїв:

Теоретично ми отримаємо носій даних, такий же швидкий, як флеш-пам'ять, але дешевий у виробництві, як магнітний, з теоретичною ємністю, що перевищує обидва. Бігова пам'ять працює, переміщуючи не диск, а самі дані. [3]

Біти зберігаються в субатомних «доменах» між областями магнітного заряду на нанодроті товщиною 1/100 000 людської волосини. Потім ці домени переміщуються вздовж дроту, як автомобілі на треку, розміщуючи їх під детектором зі швидкістю, яка в 1 мільйон разів перевищує швидкість магнітних дисків.[1]

Саме з-за наведених вище причин бігова пам'ять є перспективною новітньою розробкою, що однозначно позитивно вплине на існуючі технології і стане опорою для подальшого прогресу, будучи прямо, чи опосередковано, зв'язаною з величезною кількістю галузей науки, промисловості, фінансів і тому подібними.

РОЗДІЛ 1. БІГОВА ПАМ'ЯТЬ. КОНСТРУКЦІЯ, ВІДОМОСТІ ТА БАЗОВІ ПРИНЦИПИ

Спінтроніка — це термін, який дослідники використовують для теоретичних обчислювальних систем і систем зберігання, які використовують квантову властивість, відому як «спін», магнітну орієнтацію електрона чи іншої субатомної частинки. Усі такі частинки мають два варіанти орієнтації спінів. [3]

Ці два значення можуть стати основою для двійкової системи, яку комп'ютери використовують для зберігання цифрової інформації — системи субатомних одиниць і нулів.[2]

Також серед альтернативних способів збереження даних наразі розглядають стійкі вихроподібні магнітні структури, утворені магнітними моментами електронних спінів.

На сьогоднішній день найбільш широко визнаним комерційним успіхом спінтроніки стала розробка надзвичайно чутливих детекторів малих магнітних полів, здатних працювати при кімнатній температурі і вище. Ці магніторезистивні датчики — відомі як спінові клапани — складаються з двох ультратонких магнітних електродів, розділених прокладкою.[2]

Базова концепція трекової пам'яті може бути описана наступним чином:

Трекова пам'ять будується на основі комірок, що, в свою чергу, складаються з магнітних нанодротів, які розташовуються горизонтально або вертикально на підложці (наприклад, на кремнієвій пластині) (Рисунок 1.1).

У багатьох магнітних матеріалах, вирощених у вигляді тонкої плівки, намагніченість може приймати два стани: наприклад, спрямована вгору або вниз.

Ці стани можуть служити бітами, що представляють «0» або «1» відповідно, які можуть зберігатися на нанодроті з великою щільністю.

Направляючи електричний струм вздовж дроту, можна ініціювати переміщення бітів. Таким чином області намагнічування рухаються вздовж блоку зчитування, який часто називається портом доступу, що визначає стан намагніченості (операція зчитування).

Порт доступу також може змінювати стан намагніченості (операція запису).[2]

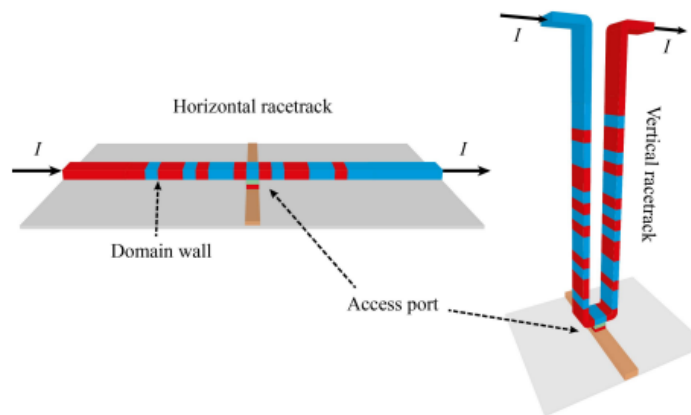


Рисунок 1.1. Горизонтально і вертикально розташовані нанодроти з одним портом доступу. Струм протікає через пристрій уздовж напрямку руху біта.[2]

Ці датчики забезпечили останні вдосконалення ємності накопичувачів на магнітних дисках, зробивши можливим зменшення площі магнітних бітів у кілька порядків [1].

Оскільки і мікроелектронні пристрої на основі кремнію, і жорсткі диски є, по суті, двовимірними (2D) масивами транзисторів і магнітних бітів, відповідно, звичайні засоби розробки дешевших і швидших пристроїв покладаються на зменшення розміру окремих елементів пам'яті або бітів зберігання даних. Альтернативний підхід полягає в тому, щоб побудувати справді тривимірні пристрої. Одним із таких підходів є «бігова» або «трекова» пам'ять [1], у якій магнітні домени використовуються для

зберігання інформації у високих колонах магнітного матеріалу, розташованих перпендикулярно на поверхні кремнієвої пластини (рис. 2).

Магнітні доменні стінки (DWs) утворюються на кордонах між магнітними доменами, намагніченими в протилежних напрямках (вгору або вниз) уздовж доріжки (рис. 1).

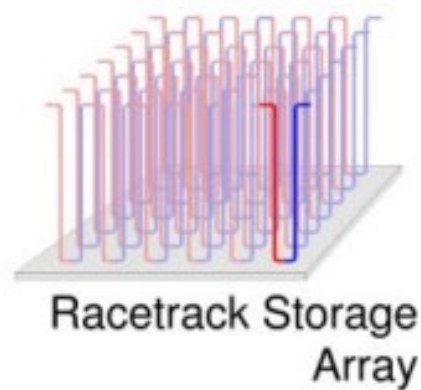


Рисунок 1.2. Масиви доріжок, побудовані на чіпі, щоб забезпечити високу щільність зберігання даних.

Представлені вище моделі не є кінцевим варіантом розвитку технології кодування інформації на нанодроті за допомогою спін-поляризації магнітних доменів на даний момент.

Одними із найбільш сучасних варіантів побудови комірок на даний момент є тривимірні моделі. Найпростішим прикладом такої побудови є модель комірки трекової пам'яті, де використовуються нанотрубки з протилежною спін-поляризацією.

Цифрові дані зберігаються в серії магнітних доменних стінок (DW) у нанодротах, розташованих у тривимірному масиві. Робота пам'яті заснована на тому факті, що магнітні домени можна переміщувати вздовж нанодротів, пропускаючи струм через дріт. Струм передає обертовий момент імпульсу від електронів провідності до магнітних моментів у DW, які зміщують їх.[1](Рисунок 1.3).

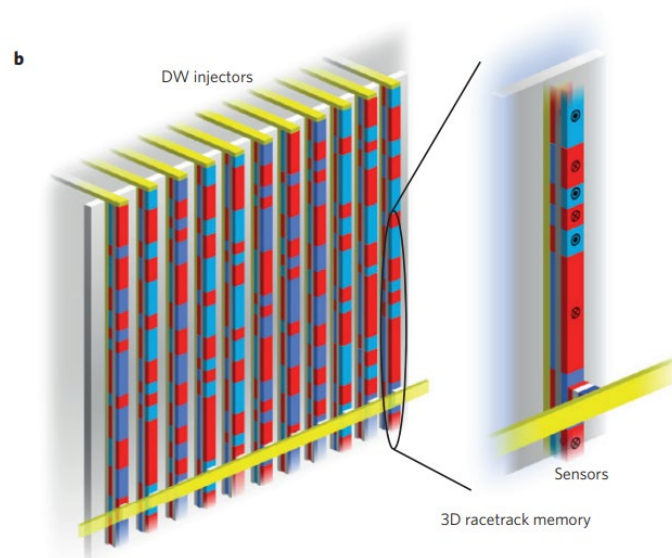


Рисунок 1.3. модель тривимірної побудови комірки трекової пам'яті, де червоні та сині області на схематичному зображенні нанодроту представляють домени із протилежними значеннями намагніченості.

Тривимірна реалізація трекової пам'яті має кілька цікавих властивостей. По-перше, це дозволяє динамічно переналаштовувати пам'ять іподрому з точки зору компромісу між продуктивністю та щільністю даних.

Забезпечуючи збереження на нанотрубці меншої за максимальну кількість магнітних доменів, час доступу до магнітних доменів можна пропорційно скоротити.

Таким чином, можна одночасно користуватись двома властивостями даного типу пам'яті:

Висока щільність запису, але менша швидкість, або висока швидкість за меншої щільності, з тією самою технологією та на тому самому пристрої.
[4]

Як згадувалося вище, нанотрубки у трековій пам'яті оснащені портами доступу або датчиками. Біти можуть бути зміщені до місця розташування порту доступу для читання або запису даних.

У звичайному жорсткому диску датчик читання/запису механічно переміщується до місця розташування магнітного біта на диску, що обертається, щоб почати операцію читання/запису.

Порти доступу або датчики трекової пам'яті фіксуються в певних місцях на доріжці, а замість цього біти електрично переміщуються до порту для виконання операцій читання/запису.

Зчитування магнітного стану може бути реалізовано за допомогою магніторезистивних ефектів [2].

РОЗДІЛ 2. СКІРМІОН. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ. ВИКОРИСТАННЯ У ТРЕКОВІЙ ПАМ'ЯТІ ТА ЛОГІЧНИХ ВУЗЛАХ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

У фізиці магнітні скірміони — це статично стабільні солітони, які були передбачені теоретично і спостерігалися експериментально в системах конденсованого середовища. Магнітні скірміони можуть бути утворені в магнітних матеріалах в їх «об'ємі», зокрема і в тонких магнітних плівках, які використовуються у технології трекової пам'яті.

Вони можуть бути ахіральними або хіральними за своєю природою і можуть існувати як у вигляді динамічних збуджень, так і у вигляді стабільних чи метастабільних станів. [6]

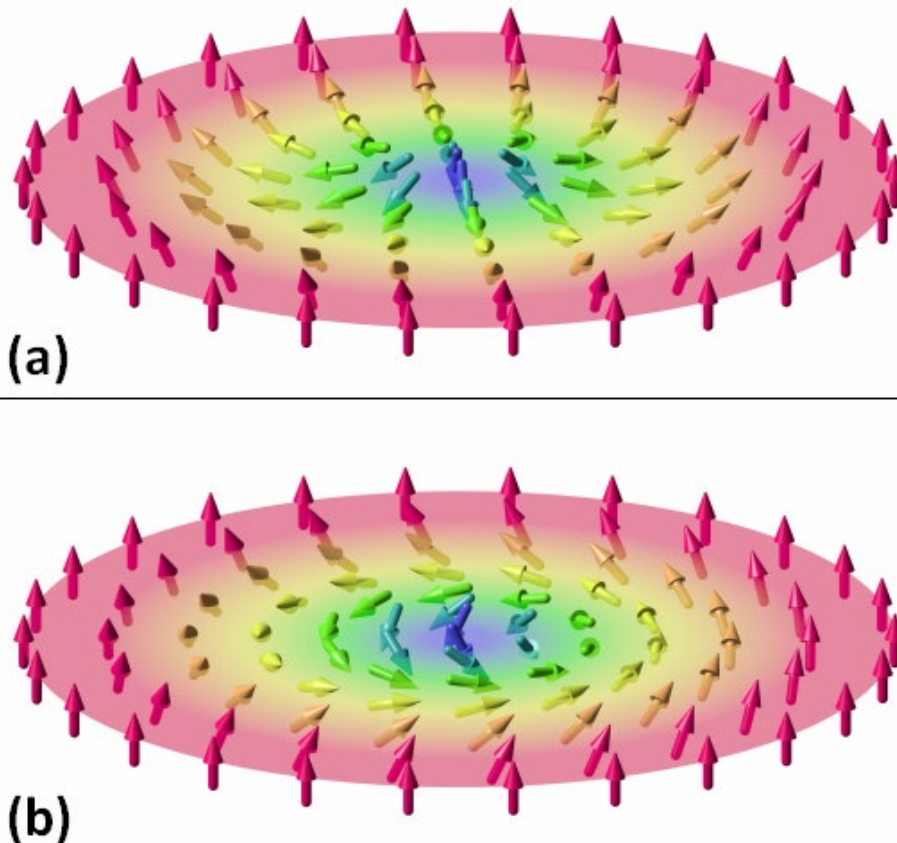


Рисунок 2.1. Варіації векторного поля двовимірних магнітних скірміонів. [6]

У магнітних матеріалах із порушеною хіральною симетрією структурна рухливість індукує хіральні зв'язки Дзялошинського–Морія, які стабілізують дво- та тривимірні локалізовані структури з фіксованим значенням обертання та нанометровими розмірами.

У фізиці антисиметричний обмін, також відомий як взаємодія Дзялошинського–Морія (DMI), є внеском у загальну взаємодію магнітного обміну між двома сусідніми магнітними спінами S_i та S_j .

Кількісно це член гамільтоніана, який можна записати як:

$$H_{i,j}^{(DM)} = D_{ij}(S_i \times S_j) \quad (2.1)$$

У деяких наукових роботах скірміони були описані як хіральні вихроподібні конфігурації, але вони є гладкими та стабільними, топологічно нетривіальними конфігураціями намагніченості i , отже, можуть бути ідентифіковані як скірміони в мікромагнітній межі з постійним модулем намагніченості $|M| = \text{const}$ [7].

Більшість описів включає поняття топології – категоризації форм і способу розміщення об'єкта в просторі – з використанням наближення безперервного поля, як це визначено в мікромагнетиці.

Описи зазвичай визначають ненульове ціле значення топологічного індексу. Це значення іноді також називають, топологічним зарядом (хоча воно не пов'язане із «зарядом» в електричному сенсі), топологічним квантовим числом (хоча воно не пов'язане з квантовим зарядом), механіки або квантово-механічних явищ, незважаючи на квантування значень індексу), або більш вільно як «число скірміона».

Топологічний індекс поля можна описати математично як:

$$n = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \times \frac{\partial M}{\partial y} \right) dx dy \quad (2.2)$$

Тут n – топологічний індекс, M – одиничний вектор в напрямку локальної намагніченості всередині тонкої, ультратонкої або об'ємної магнітних плівок. [6].

Скірміони відрізняються від інших осесиметричних моделей, індукованих зовнішніми силами «диполь-диполь» (бульбашкові домени в наношарах і магнітні вихори в магнітних наноточках).[7]

Нещодавно було передбачено та встановлено, що новий вид взаємодії існує в магнітних матеріалах: (v) короткочасна та сильна взаємодія Дзялошинського-Морія (скорочено DM взаємодія або DMI), яка сприяє «кривині» намагніченості.

Взаємодія DM знаходиться в прямій конкуренції з обмінною взаємодією: обмінна взаємодія хоче досягти однорідної конфігурації векторного поля, а DMI намагається «скрутити» намагніченість.

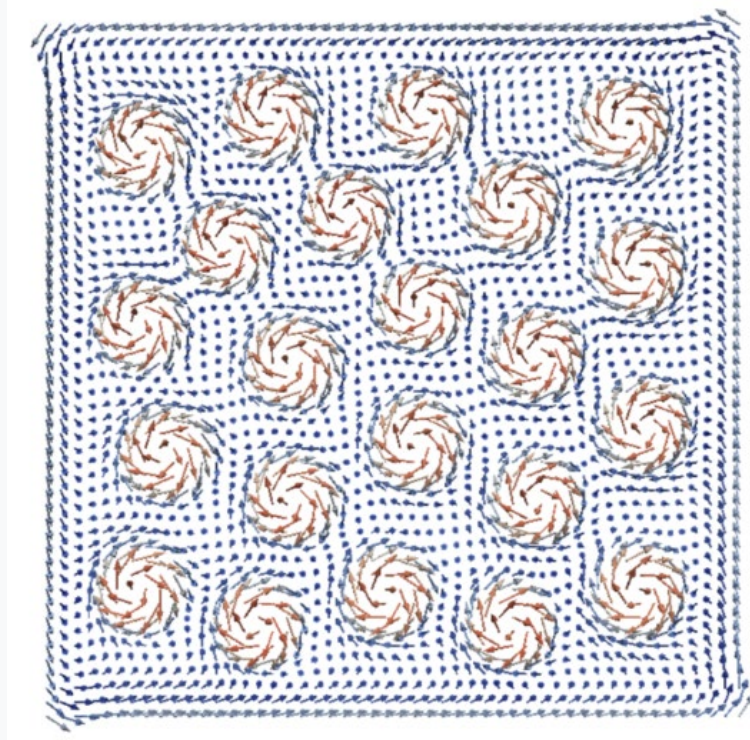


Рисунок 2.2. Масив скірміонів у тонкій магнітній плівці. Стрілки показують місцевий напрямок намагніченості. Об'єкти, схожі на вихори, є скірміонами.

Скірміони діють як частинки і відштовхуються один від одного. У нескінченній плівці вони утворили б упорядковану гексагональну решітку, щоб мінімізувати свою енергію. [8]

Нещодавно було повідомлено про спостереження таких хіральних скірміонів у нанощарах нецентросиметричних кубічних феромагнетиків $(\text{Fe}, \text{Co})\text{Si}$ та FeGe та в моношарах Fe із сильним поверхнево-індукованим зв'язком DM. Цей експериментальний прорив є не лише вражаючою демонстрацією унікального явища: статичних солітонів та утворення солітонних мезофаз у хіральній конденсованій системі. Ці експерименти також являють собою новий шлях для магнітного зберігання даних і технологій спінтроніки.

Хіральні скірміони, як магнітні неоднорідності, локалізовані в плямах розміром кілька нанометрів, можна вільно створювати та маніпулювати ними.[7]

Для моделювання мікромагнітних частинок таких, як скірміони використовується програмне забезпечення Nmag [9][10] на базі мов програмування C/C++ та Python, що дозволяють виконувати розрахунки та візуалізацію отриманих результатів.

Також для моделювання використовується дискретизація по кінцевим елементам простору та бібліотека FEniCS – обчислювальна платформа з відкритим вихідним кодом для розв'язування диференціальних рівнянь із частинними похідними (PDE) методом скінченних елементів (FEM).[9][11]

Симуляція скірміонів відбувається у вигляді векторних полів на площині, або у просторі.

За допомогою згаданого вище відкритого програмного забезпечення було опрацьовано дані бібліотеки FEniCS для моделювання мікромагнітних елементів, та отримано векторне схематичне зображення скірміона:

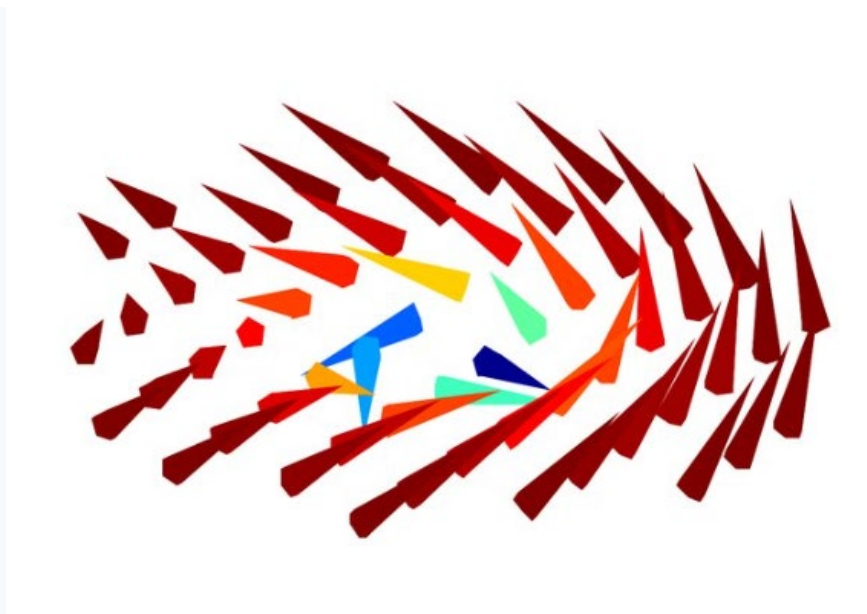


Рисунок 2.3. Векторне зображення стану скіріміону в напівеліпсоїді з великою віссю 20 нм і малою віссю 15 нм. Для наочності показано лише підмножину локальних магнітних моментів.

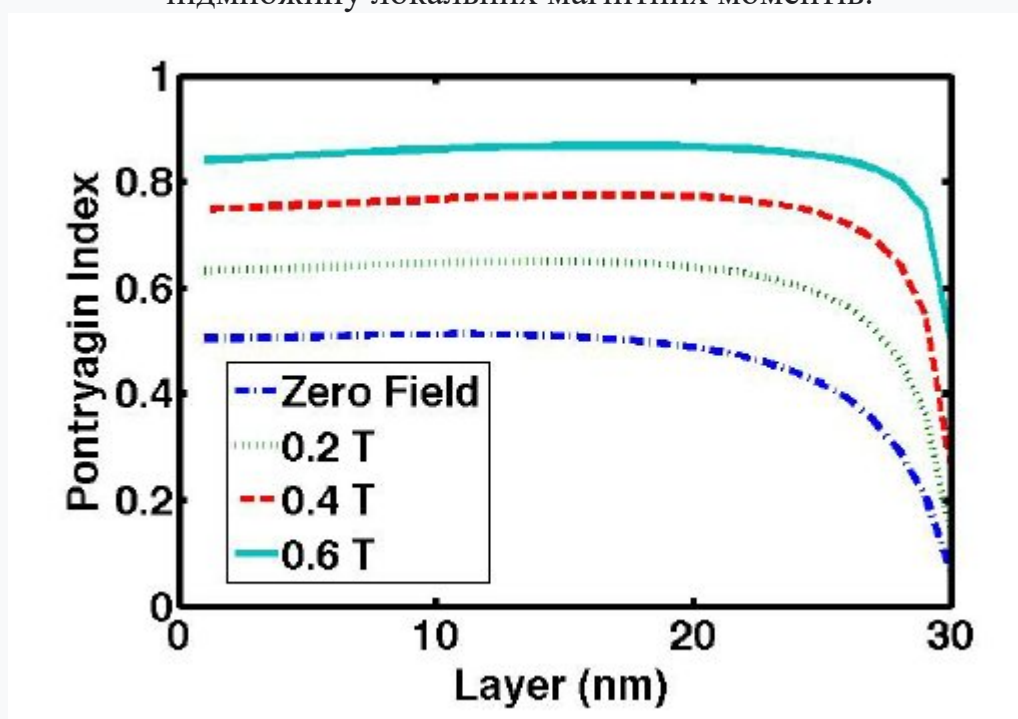


Рисунок 2.4. Векторний графік стану скіріміону в еліпсоїді з великою віссю 20 нм і малою віссю 15 нм. Для наочності показано лише підмножину локальних магнітних моментів.

Зображення 2.3 та 2.4 отримані за допомогою обчислювальних можливостей персональної комп'ютерної техніки. Для досліджень груп

мікромагнітних частинок, що складаються з багатьох векторів поляризації необхідне збільшення обчислювальної потужності.

Якщо припустити повільну зміну обертових текстур, можна вдатися до моделі грубого континууму для опису магнітних властивостей хіральных магнітів[12]:

$$H = \int d^3r \left[\frac{J}{2a} (\nabla M(r))^2 - \frac{B \cdot M(r)}{a^3} + \frac{K}{a^2} M(r) \cdot [\nabla \times M(r)] \right] \quad (2.3)$$

Вираз складається з феромагнітного обміну J , магнітного поля B , і ДМ взаємодії K . a - типова відстань над якою спінову структуру можна розглядати як рівномірно впорядковану з урахуванням грубозернистої процедури.[12]

Цю ефективну модель слід розуміти у зв'язку з ренормалізаційною групою, що означає, що терміни, що враховують фактичну структуру мікроскопічної решітки, можуть бути відкинуті через те, що вони нерелевантні в критичній точці. [12]

Гамільтоніан решітки виражається через суму спінових компонент і після перетворення Фур'є має вигляд:

$$H_{FM} = J \sum_k \alpha_k S(k) \cdot S(-k) \quad (2.4)$$

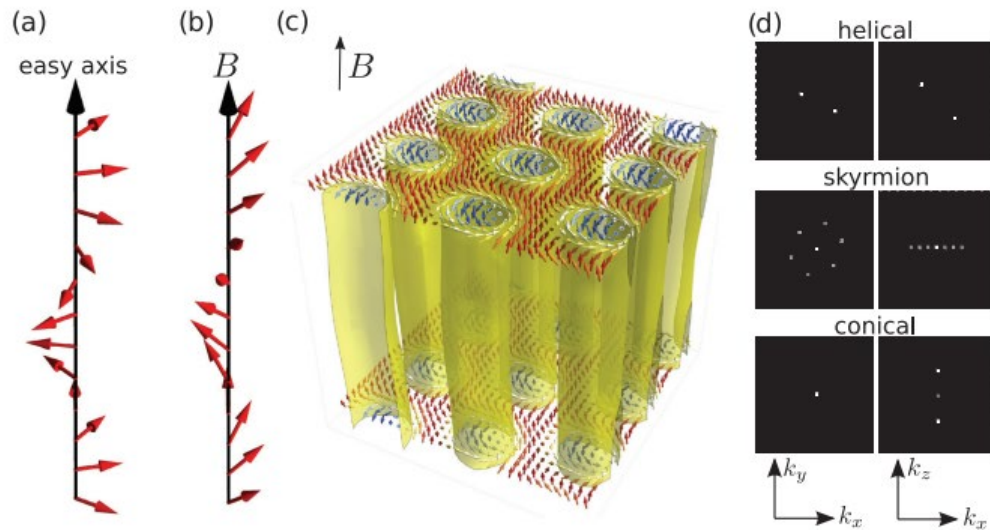


Рисунок 2.5. (a) Схема намагніченості в спіральній фазі. (b) Схема намагніченості в конічній фазі. (c) Усереднена намагніченість у фазі скіріміону у двох різних кристалічних площинах. Намагніченість у напрямку зовнішнього поля зникає вздовж жовтих трубок. (d) Шаблони інтенсивності Брегга, спроектовані на площину (001) (яка є $\perp B$) (ліворуч) і площину (010) (праворуч) з параметрами для спіральної фази, фази скіріміону, і конічної фази.

Метод Монте-Карло:

Різні фази в нашій задачі можна відрізнити або від спінових текстур у реальному просторі, або, що простіше, від спінового структурного фактора у зворотному просторі. Ми обчислюємо середню спінову конфігурацію S_r зазвичай з 2000 спінових конфігурацій, розділених 30 розгортками решітки, а потім Фур'є перетворюємо середню конфігурацію в імпульсний простір:

$$\langle S_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_r (S_r) \exp(-i k \cdot r) \quad (2.5)$$

Після цього ми аналізуємо профіль інтенсивності Брегга

$I(k) \propto ||S_k||^2$, який відповідає тому, що вимірюється в експериментах з розсіювання нейтронів.

Одна спіраль із хвильовим вектором Q характеризується двома бреггівськими плямами, розташованими на Q і $-Q$ (як вимагає реальний параметр порядку).

Таким чином, спіральну та конічну фази можна легко розрізнити за напрямком Q (хоча Q паралельний магнітному полю в конічній фазі, у спіральній фазі він уздовж $[111]$).

Фаза ґратки скірміона має багатшу структуру, і її легко ідентифікувати за шістьма плямами Брегга, які розташовані на правильному шестикутнику в площині, перпендикулярній V . Спінові структури для фази ґратки скірміона, а також шаблони інтенсивності Брегга для всіх трьох фаз (Рис. 2.5).[12]

Постійна мініатюризація пристроїв CMOS (комплементарний металооксидний напівпровідник) призвела до різних складних аспектів, таких як збільшення розсіювання потужності та стабільність пристрою.

Закон Мура для CMOS наближається до фундаментальних фізичних обмежень, накладених нагріванням і принципом невизначеності Гейзенберга. Зважаючи на це, все більше зусиль докладається для визначення альтернативних або гібридних технологій як заміни CMOS.

На поточному етапі енергонезалежна пам'ять і логіка, засновані на наномагнітних елементах, показали великі перспективи в цьому відношенні. Наномагнітна логіка має потенціал для об'єднання магнітної реконфігурації в реальному часі та універсальної пам'яті з високою термічною стабільністю та енергонезалежністю.

Багатообіцяючою архітектурою магнітної пам'яті є трекова пам'ять, спочатку запропонована IBM, де інформаційний біт може бути закодований у магнітних областях, розділених доменними стінками (DW), які можна переміщувати за допомогою спін-передачі-крутного моменту (STT).

Не зважаючи на початкові очікування від трекової пам'яті на основі магнітних долменів, її технологічне впровадження було обмежено закріпленням, що є результатом наявності дефектів (краю та/або шорсткості поверхні, дислокації, недосконалості тощо), межі Уокера та нагрівання Джоуля.

Ці межі були частково подолані спін-ефектом Холла (SHE) та взаємодією Дзялошинського–Морія (DMI) у високоперпендикулярних матеріалах. Зокрема, міжфазний DMI стабілізує стінки Нееля з заданою хіральною, відмінною від конфігурації стінки Блоха, очікуваної від магнітостатики, тоді як спіновий струм, створений SHE, призводить до руху

Неєля DW на вищих швидкостях (400 м/с) і нижчим струмом порівняно з Bloch DW (його можна перемістити лише STT).

Також було передбачено, що DMI має бути ключовим інгредієнтом для зародження скірміонів. Ці топологічно захищені магнітні конфігурації можуть кодувати інформацію та бути основою нового типу трекової пам'яті.[14]

Логічні ворота:

Магнітні скірміони — це топологічно захищені спінові текстури, і вони підходять для майбутніх додатків логічної пам'яті для енергоефективних, високошвидкісних технологій обробки інформації та обчислень.

Рух скірміона контролюється введенням затвора, який працює на керуваній напругою магнітній анізотропії. Тут неоднорідна магнітна анізотропія поводить як регульований потенційний бар'єр/яма, яка модулює траєкторію скірміона в структурі для успішної реалізації мажоритарного логічного вентиля.

Крім того, було показано, що кілька інших ефектів, таких як топологічне відштовхування скайрміон-скірміон, відштовхування на краю скірміона, спин-орбітальний крутний момент і ефект Холла скайрміона, керують логічними функціями.

У наукових роботах наводяться надійні логічні операції, змінюючи щільність струму, магнітну анізотропію, розмір затвора, керуваного напругою, і геометричні параметри логічного пристрою.

Кут Холла скірміона контролюється, щоб зрозуміти траєкторію та стабільність скірміона як функцію часу в логічному пристрої [15]

Бігова скірміонна пам'ять зазвичай отримується за чотирма різними сценаріями (A), (B), (C) і (D), поєднуючи тип скірміона Блоха (азимутальна намагніченість на межі скірміона) або Ніла (радіальна намагніченість на межі скірміона) і його рух керується передачею спінового момента або спіновим ефектом Хола

На рис. 2.6. узагальнено чотири різні сценарії, а на вставках показано типи скірміонів. У сценаріях A, C і D магнітна смуга дорівнює $1000 \times 100 \times 1 \text{ нм}^3$, а в сценарії B – $100 \times 1000 \times 1 \text{ нм}^3$. Також була введена декартова система координат. Струм завжди тече вздовж позитивного напрямку x.

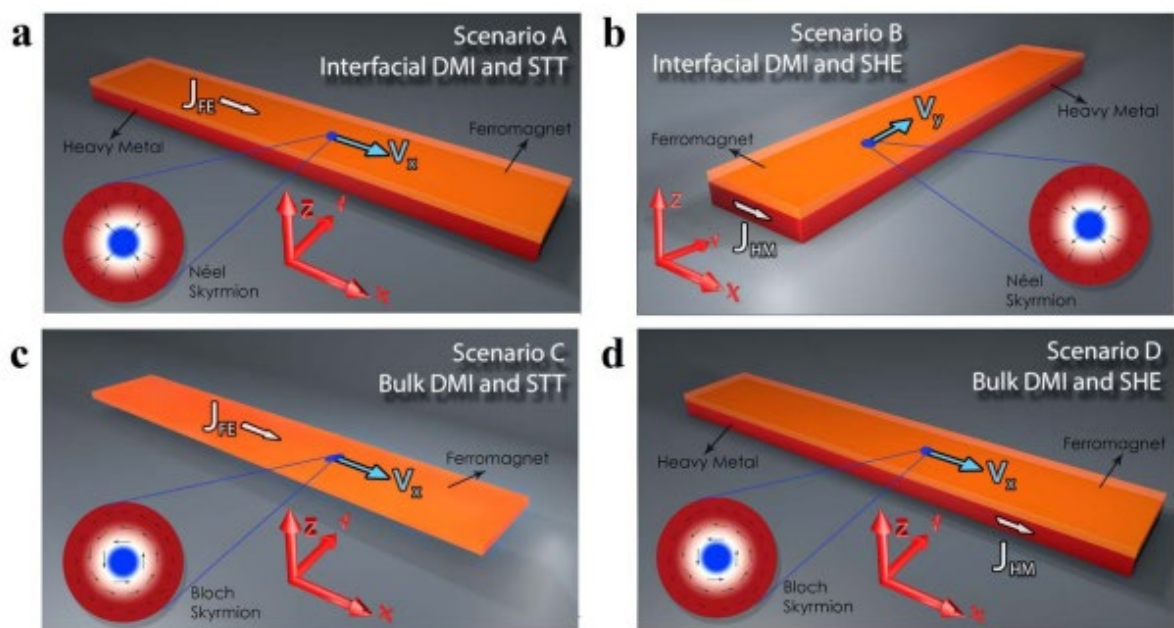


Рисунок 2.6. Чотири різні сценарії розробки трекової скірміонної пам'яті. (a), рух скірміона Ніла, керований передачею спінового момента. (b), рух скірміона Ніла, керований спіновим ефектом Хола. (c), рух скірміона Блоха, керований передачею спінового момента. (d), рух скірміона Блоха, керований спіновим ефектом Хола. Чотири вставки показують просторовий розподіл скірміона Ніла та Блоха, де фонові кольори відносяться до z-компоненти намагніченості (синій негативний, червоний позитивний), а стрілки пов'язані

з площинними компонентами намагніченості. намагніченість. Струм тече вздовж напрямку x . Скірміон рухається вздовж напрямку x у сценаріях А, С і D і вздовж напрямку y у сценарії В.[14]

Схема мажоритарного логічного вентиля на основі скірміона показана на рисунку 2.7.

Логічний пристрій має три входи та один вихід, де шлях скірміона контролюється за допомогою вентиля, керованого напругою (VCG). VCG має довжину (L) 215 нм і ширину (w) 30 нм, який розташований в середині логічного пристрою.

Пристрій містить гетероструктуру з феромагнітного металу (FM)/важкого металу (HM), де шар HM розміщений під шаром FM. Верхній шар FM використовується для розміщення скірміона, а товщина встановлюється на 0,8 нм.

Архітектура пристрою має нижню прямокутну частину (довжина (a) = 450 нм і ширина (b) = 210 нм) і верхню прямокутну частину (довжина (c) = 180 нм і ширина (d) = 75 нм) при кут нахилу (θ) 45° .

Прямокутна виїмка розміром $90 \times 20 \text{ нм}^2$ ($m \times n$) розміщена зліва від нижнього прямокутника, який розділяє входи В і С, як показано на рисунку 2.5.

Вхід А розташований у верхній прямокутній частині для зародження скірміона та вихідний сигнал (Y) розміщується на відстані 60 нм від правого краю нижнього прямокутника, щоб виявити скірміон. Три входи та одне вихідне положення відображаються круглими дисками на схемі рисунка 2.5.

Зауважте, що зародження та виявлення магнітного скірміону можна досягти за допомогою магнітних тунельних переходів (МТТ) для практичної

реалізації входів та виходів і добре вивчені в недалекому минулому. Тут ми в першу чергу зосереджуємося на контролі над рухом скірміона за допомогою VCG для успішної реалізації більшої частини логічних операцій. [15]

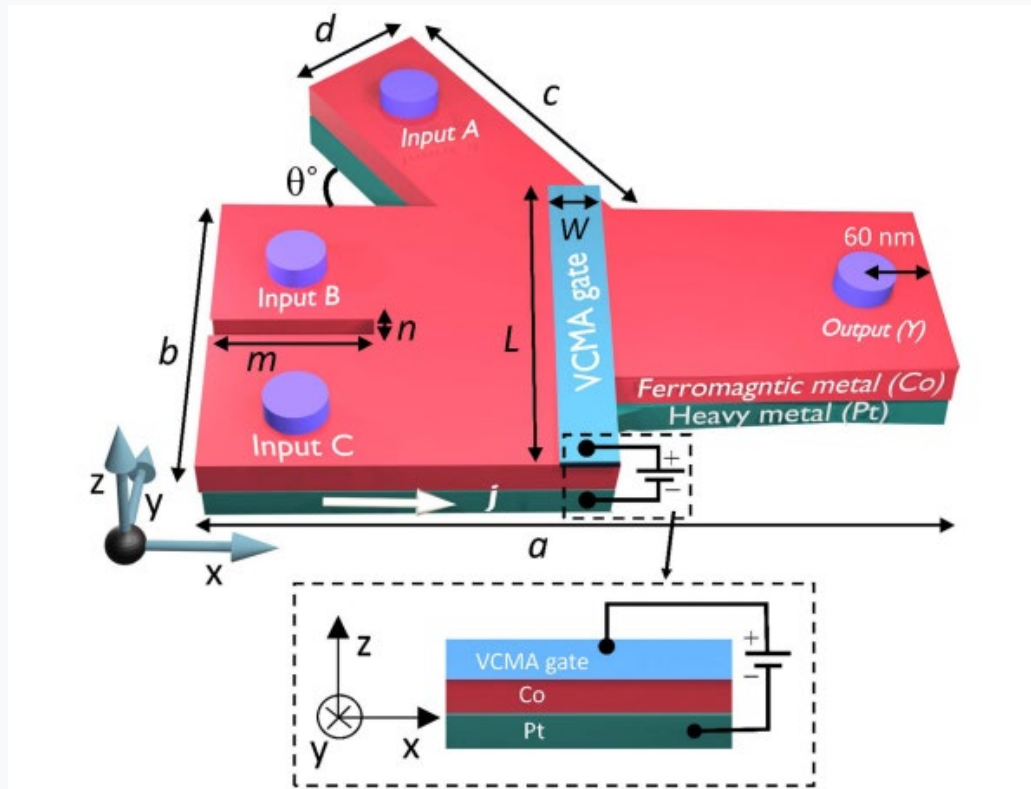


Рисунок 2.7. Схема мажоритарного логічного вентиля на основі скірміонів з трьома входами (A), (B) і (C) і одним виходом (Y) з контрольованим напругою вентиляем магнітної анізотропії – VCMA.

Поєднання обертового струму для керування скірміонами та VCMA для локального керування траєкторією скірміонів призвело до відкриття скірміонних пристроїв.

Серед існуючих концепцій – магнітний скірміонний транзистор, у якому скірміонний шлях контролюється напругою на затворі через модуляцію перпендикулярної магнітної анізотропії в області затвора.

Експериментально проведено закріплення/відкріплення скірмаіона в трековій пам'яті за допомогою ефекту VCSMA. У недавньому минулому були продемонстровані різні конструкції логічних елементів, розроблених для виконання основних логічних операцій з 2 входами за допомогою VCSMA.

Однак логічні вентиля з кількома входами обмежені. Порогова логіка є багатообіцяючою логічною схемою, оскільки можна реалізувати дуже просту схему, яка може виконувати кілька функцій.

Він привернув велику увагу, оскільки його можна використовувати в нейроморфних обчисленнях. Мажоритарна логіка є окремим випадком порогової логіки з рівноваговими входами. Для уточнення, результат є «1», якщо більше 50% вхідних даних дорівнюють «1» та «0» в іншому випадку.

Мажоритарна логіка може виконувати різні функції для досягнення ефективного та компактного пристрою в сучасний час. Двійкові операції І та АБО можуть бути реалізовані з мажоритарного логічного вентиля, зберігаючи будь-який із входів фіксованим. Конкатенація мажоритарних вентилів дозволяє створити складні схеми, такі як суматори та мультиплексори.[15].

Приклади роботи логічних комірок з різними вхідними даними наведено на рисунку 2.8.

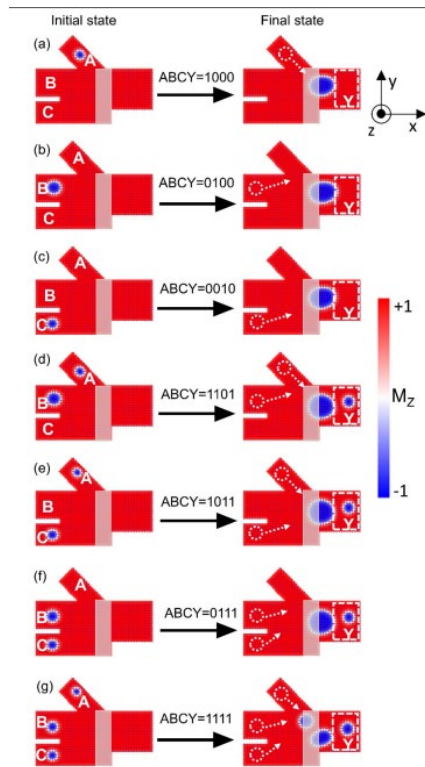


Рисунок 2.8. Початковий та кінцевий магнітні стани пристрою для логічних станів (a) 100 (b) 010 (c) 001 (d) 110 (e) 101 (f) 011 та (g) 111. Лінія смужки білого кольору в середині логічного пристрою представляє область VCG.

На таблиці 2.1 наводяться приклади реалізації логічних операцій Булевої алгебри:

Input A	Input B	Input C	Y = AB + BC + CA
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

} AND
 } OR

Таблиця 2.1. Таблиця істинності мажоритарного логічного вентиля з 3 входами. Наявність і відсутність скіріміону представлені як 1 і 0 відповідно.

ВИСНОВОК

Проведений аналіз літературних джерел явно демонструє перспективність досліджень у галузі спінтроники, зазначаючи їх безпосередній позитивний вплив на розвиток обчислювальної техніки, що також опосередковано впливає на прогрес інших галузей, таких як освіта, наука та промисловість, тощо.

У роботі наведено відомості про розвиток, структуру та сучасні дослідження в області трекової пам'яті та їх теоретичні засади. Зазначено відомості про використання магнітних частинок, скірміонів, у новітніх розробках та дослідженнях у галузі трекової пам'яті та проектуванні логічних вузлів комп'ютерної техніки з їх використанням.

Виконано моделювання схематичного векторного зображення скірміона, як магнітної частинки за допомогою пакетів програмного забезпечення та бібліотек даних, що знаходяться у відкритому доступі, та проведено аналіз моделі.

Дослідження доводять перспективність даної теми, оскільки збільшення довговічності та ємності сучасних пристроїв зберігання даних, разом із перевагами, пов'язаними із варіативністю налаштувань та розробка елементів логіки комп'ютерної техніки з використанням скірміонів має потенціал скорого переходу на промислові рейки та всебічне залучення у побутовій та промисловій техніці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Parkin S., Yang S.-H. Memory on the racetrack. *Nature Nanotechnology*. 2015. Vol. 10, no. 3. P. 195–198.
2. Magnetic Racetrack Memory: From Physics to the Cusp of Applications Within a Decade / R. Blasing et al. *Proceedings of the IEEE*. 2020. Vol. 108, no. 8. P. 1303–1321.
3. Magnetic spin and the future of data storage | IBM. *IBM - United States*. URL: <https://www.ibm.com/history/racetrack-memory>
4. Spintronics based random access memory: a review / S. Bhatti et al. *Materials Today*. 2017. Vol. 20, no. 9. P. 530–548.
5. A strategy for the design of skyrmion racetrack memories / R. Tomasello et al. *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4, no. 1.
6. Contributors to Wikimedia projects. Magnetic skyrmion - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_skyrmion.
7. Chiral skyrmions in thin magnetic films: new objects for magnetic storage technologies? / N. S. Kiselev et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011. Vol. 44, no. 39. P. 392001.
8. Computer Simulation of Magnetic Skyrmions. *Homepage | University of Southampton*. URL: <https://www.southampton.ac.uk/~fangohr/vacancies/20-skyrmions.html>
9. Contributors to Wikimedia projects. Antisymmetric exchange - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Antisymmetric_exchange
10. Nmag - computational micromagnetics. *Nmag - computational micromagnetics*. URL: <https://nmag-project.github.io/>
11. FEniCS. *FEniCS Project*. URL: <https://fenicsproject.org/>

12. Buhrandt S., Fritz L. Skyrmion lattice phase in three-dimensional chiral magnets from Monte Carlo simulations. *Physical Review B*. 2013. Vol. 88, no. 19.
13. A Comparative Cross-layer Study on Racetrack Memories / W. Kang et al. *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*. 2020. Vol. 16, no. 1. P. 1–17.
14. A strategy for the design of skyrmion racetrack memories / R. Tomasello et al. *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4, no. 1.
15. Skyrmion based majority logic gate by voltage controlled magnetic anisotropy in a nanomagnetic device / B. Paikaray et al. *Nanotechnology*. 2023.