

FIZYKA

Teoretyczna fizyka

Чурсанова М.В., Кучер В.А.

*Національний технічний університет України “КПІ” ім. Ігоря Сікорського,
Україна*

СПІНОВІ ДІОДИ

На сучасному етапі розвитку мікро- та наноелектроніки задача зменшення розмірів та зниження часу та енергії перемикання електронних елементів вже досягла своєї межі, і закон масштабування інтегральних схем перестає працювати. Це викликає необхідність використання нових підходів до підвищення продуктивності інтегральних схем. Один з них – використання в якості носія інформації в інтегральних схемах не тільки заряду, а й спіна електрона, тобто використання спінових пристроїв [1].

Початком сучасного етапу досліджень в області спінтроники прийнято вважати роботи [2, 3], в яких було експериментально показано, що електричний струм у феромагнітному металі поляризований за спіном, і було відкрито явище гігантського магнітоопору. Поляризація струму, коли спіни електронів направлені в одному напрямку, утворює спіновий струм. Це відкриває можливість управління транспортом спінів у феромагнітних структурах за допомогою магнітних полів [4]. В даний час вчені вже навчилися виготовляти спінтронні наногенератори, детектори мікрохвильового випромінювання і магнітного поля, які перевершують свої електронні аналоги [5].

Спінтронна технологія має багато переваг. Одні з найважливіших - швидкість і економічність. Спін електрона можна перемикати з одного стану в інший за багато менший час, ніж потрібно на переміщення заряду по схемі, і з меншими витратами енергії. Плюс до цього, при зміні спіна не змінюється кінетична енергія носія, а, отже, майже не виділяється тепло. У сукупності всі ці особливості технології дозволяють створювати на базі спіна і спінових струмів нові транзистори, логічні елементи пам'яті, які замінять собою звичайні транзистори в інтегральних мікросхемах. А це, в свою чергу, дозволить

дотримуватися тенденції до мініатюризації, яка спостерігається протягом усієї мікроелектронної епохи [6].

Визначальним відкриттям та одним із основних об'єктів досліджень в спінтроніці є спіновий вентиль, або клапан (spin valve), що є аналогом напівпровідникового діоду в електроніці. У найпростішому випадку спіновий вентиль (спіновий діод) складається з двох струмопровідних феромагнітних контактів, розділених досить тонким каналом транспорту електронів [4]. Така структура здатна випрямляти струм, що проходить крізь неї, аналогічно до діоду напівпровідникового.

В основі роботи спінового діода лежать ефекти тунельного магнітоопору і обертання в результаті перенесення спіна (spin-transfer torque effect). При пропусканні звичайного струму через перший шар феромагнетика спіни електронів вишиковуються уздовж намагніченості феромагнетика, тобто струм стає спіновим. Потім електрони тунелюють через діелектрик і стикаються з іншим феромагнітним шаром. Залежно від кута між намагніченістю шару і спінами електронів, частинки краще або гірше проходять через нього - отже, опір приладу залежить від орієнтації магнітних шарів (перший ефект). Одночасно з цим електрони намагаються повернути другий шар, щоб проходити через нього було простіше (другий ефект). Тому якщо пропускати через діод змінний струм, намагніченість його шарів – а отже, і опір – буде коливатися одночасно з величиною струму, і в результаті струм випрямляється [5].

Завдяки цим ефектам можна виготовляти спінові діоди з чутливістю понад 100 000 вольт на ват, хоча максимальна чутливість звичайних напівпровідникових діодів Шоттки не перевищує 3 800 вольт на ват. Чутливість – це відношення напруги вихідного постійного струму до потужності прикладеного змінного струму; грубо кажучи, вона описує, наскільки добре пристрій випрямляє струм [5].

Проте, є у спінових діодів і недоліки. Наприклад, їх чутливість сильно залежить від частоти змінного струму, різко зростає близько резонансного значення і залишається близькою до нуля далеко від нього. Крім того, резонансні частоти всіх виготовлених раніше спінових діодів не перевищують двох гігагерц.

Спіновий клапан або спіновий діод складається з двох звичайних електродів, "вільного" феромагнетика, дуже тонкого шару нормального не феромагнітного металу і "фіксованого" феромагнетика. Магніторезистивну

комірку на основі явища "тунельного магнітоопору", називають "магнітним тунельним переходом" (Magnetic Tunnel Junction - MTJ) [7].

Основною характеристикою цих спінтронних пристроїв є залежність прохідного електричного опору пристрою або електричного струму, який протікає крізь нього (при постійній доданій напрузі), від індукції зовнішнього магнітного поля.

Логіка вживання назви спіновий клапан полягає в тому, що електричним струмом, що протікає крізь такий пристрій, можна керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля опосередковано, змінюючи орієнтацію спінів у "вільному" феромагнітному шарі. Деякі автори називають описаний вище спіновий клапан і магнітний тунельний перехід також спіновими діодами. Ця назва пов'язана з тим, що ці пристрої, як і діод, мають 2 виведення і добре пропускають електричний струм лише тоді, коли намагніченості відповідних феромагнетиків співнаправлені.

На основі спінових діодів можна реалізувати спінтронну гальванічну розв'язку двох електричних схем. Коли через шину входу пропускають вхідний струм того чи іншого напрямку, то створюване ним магнітне поле перемагнічує "вільний" феромагнетик у відповідному напрямку. А від цього залежить величина вихідного струму. Вхідне і вихідне коло при цьому гальванічно розв'язані.

Робота таких спінтронних пристроїв аналогічна роботі оптоелектронної гальванічної розв'язки. Вхідний струм тече тут через світлодіод, що оптично пов'язаний з фоторезистором. Від того, чи випромінює світлодіод, залежить величина вихідного струму. Але спінтронні аналоги при нанорозмірах магніторезистивної комірки працюють набагато швидше: частота перемикань досягає декількох десятків гігагерц [7].

Література:

1. Н.И. Плюснин "Спиновые инжекторы и транзисторы для кремниевой спинтроники" / Известия вузов. Электроника – 2016. – Том 21, № 2 – с.128-138
2. Baibich, M. N. "Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices" / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas // Physical Review Letters. – 1988. – Vol. 61, Issue 21. – p. 2472–2475.

3. Binasch, G. “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange” / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn //Physical Review B. – 1989. – Vol. 39, Issue 7. – p. 4828–4830.
4. Ю. А. Кругляк "Наноэлектроника «снизу – вверх»: начала спинтроники и магнетроники" / Scientific Journal «ScienceRise» - 2015. – Vol.8/2(13) – p.51-68
5. A. A. Khudorozhkov, P. N. Skirdkov, K. A. Zvezdin, P. M. Vetoshko, and A. F. Popkov “Spin-torque diode frequency tuning via soft exchange pinning of both magnetic layers” / Phys. Rev. B – 2017. – Vol. 96, - p. 214410
6. <https://hi-news.ru/science/spintronika-budushhee-elektronnyx-ustrojstv.html>
7. <https://intuit.ru/studies/courses/12180/1173/lecture/24913>