

# Racetrack: un nou tip de memorie

(Racetrack: a New Type of Memory)  
(Full text in Romanian)

Titu-Marius I. BĂJENESCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prof., Doctor Honoris Causa of Military Technical Academy of Romania and of Technical University of Republic of Moldova (Chișinău); Romanian Academy Prize „Tudor Tănăsescu” Laureate; La Conversion, Switzerland

## Abstract

Stuart Parkin of IBM's Almaden Research Centre came up with the concept of spintronics-based memory that has no moving parts, but in which the information moves. Racetrack memory stores digital data in the magnetic domain walls of nanowires. The bits of information, which are stored in the wire using the spin of electrons rather than an electronic charge, would be moved around at several hundred meters per second, using a spin polarized current. Adjacent bits would be delineated from one another via domain walls with magnetic vortices. This technology promises to yield information storage devices with high reliability, performance and capacity.

**Keywords:** spintronics, spin polarized current, storage, data walls, performance, reliability, capacity.

Received: June, 23, 2016

## To cite this article:

BĂJENESCU I.T.M., „Racetrack: un nou tip de memorie” (Racetrack: a New Type of Memory), in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 88-93, ISSN 1582-5175.

## 1. Introducere

Un important domeniu al nanotehnologiilor este spintronica (cuvânt rezultat din contractia cuvintelor engleze *spin transport electronics*). Informatica utilizează sarcina electrică a unui electron pentru stocarea și transmiterea de date. Controlând electronii cu un semiconductor de dimensiuni nanometrice, se poate exploata spinul electronului (sau proprietățile sale magnetice). Această tehnică îmbunătățește considerabil stocarea și transportul informației. IBM și Intel investesc anual averi în utilizarea nanotehnologiilor pentru ameliorarea performanțelor memoriilor.

În 1995, de exemplu, IBM a construit o memorie spintronică bazată pe intersecții de tunel magnetic. Datele erau stocate în stare magnetică în joncțiunea tunel magnetic și puteau fi citite cu ajutorul magneto-rezistenței tunelare a dispozitivului. Aceste memorii magnetice cu acces aleatoriu (sau MRAMs) au fost comercializate în 2006 de Freescale Semiconductor, un spin-off al firmei Motorola.

Electronii au o sarcină și un spin, dar - până de curând - ele au fost luate în considerare separat. În electronica clasică, sarcinile sunt deplasate prin câmpuri electrice pentru a transmite informații și sunt stocate într-un condensator pentru a fi salvate. La înregistrarea magnetică, câmpurile magnetice sunt folosite pentru a citi sau a scrie informațiile stocate în magnetizare, care "măsoară" orientarea locală a spinilor în feromagneți.

Lucrurile au început să se schimbe în 1988, când descoperirea magneto-rezistenței gigant (*giant magnetoresistance GMR*) a deschis calea spre un control eficient al transportului sarcinii prin magnetizare. Recenta extindere a înregistrării pe hard disk datorează mult acestei evoluții. Iar noile descoperiri științifice deschid o nouă paradigmă în care dinamica magnetizării și curenții de sarcină acționează reciproc unii asupra altora în materiale artificiale nanostructurate. În cele din urmă, "curenți de spin" ar putea înlocui curenții de sarcină pentru transferul și prelucrarea informațiilor, permițând operațiuni de

energie joasă mai rapide: "electronica de spin" este abia la început de drum.

În 1996, John Slonczewski [2] și Luc Berger [3] au prezis fenomenul transferului de spin care descrie efectul unui curent polarizat în spin asupra magnetizării unei nanostructuri. Într-adevăr, o parte din momentul cinetic de spin al electronilor poate fi transferat magnetizării care generează cuplul de transfer de spin. Subiectul acesta a suscitât un deosebit interes [4-8]. Inversarea magnetizării de către un curent polarizat în spin ar putea mult ameliora memoriile MRAM, în timp ce precesiunea prin curent polarizat în spin ar putea deschide calea către oscilatori de înaltă frecvență [9-10]. Propagarea unui perete de domenii magnetice prin curent polarizat în spin se află în centrul unui proiect de cercetare privind memoriile racetrack, la care lucrează o echipă de la IBM, condusă de Stuart Parkin [11].

"Am dorit să dezvolt un nou hard disk, în care biții călătoresc spre senzor și nu invers", spune Parkin. Acesta a fost argumentul care l-a condus la *Racetrack Memory RM* (memorie tip circuit de cursă).

În 2005, a avut loc prima sa prelegere bazată pe conceptul Racetrack și tot atunci a depus primul brevet. Cu memoria tip circuit de cursă Parkin urmărește o a treia metodă pentru a manipula biți magnetici de stocare: În loc de magnetism - ca în cazul de citire-scriere - sau de un fascicul laser - așa cum încearcă elvețienii de la institutul "Paul Scherrer"- se poate utiliza, de asemenea, electricitatea.

## 2. Magnetorezistența gigant MRG

Să ne imaginăm electronul ca o minge care se învâрте în jurul propriei axe; acest spin electronic poate să aibă două valori: «up» sau «down». Prin aplicarea unui câmp magnetic asupra unui dispozitiv electronic, se poate controla polarizarea de spin a curentului care se propagă prin circuit. Dacă am reuși ca fiecareia din cele două sensuri de spin al electronilor «up» și «down» să-i atribuim codificarea controlată a valorilor 0 și 1 din sistemul binar,

ar putea avea loc o nouă revoluție în IT. Când electronii călătoresc printr-un metal magnetizat, electronii spin-up călătoresc mai ușor, rezultând un curent polarizat de spin sau spin polarizat, în care cea mai mare parte a electronilor în mișcare transportă un spin specific. În contrast, un curent obișnuit, cum ar fi o deplasare de-a lungul unui conductor de cupru, implică electroni ai căror spini sunt îndreptați în mod aleatoriu în toate direcțiile. Permalloy, un aliaj puternic magnetic de nichel și fier, poate produce 90 la sută din polarizarea spinului într-un curent.

Senzorul de supapă-spin constă dintr-un nanosandviș alcătuit dintr-un strat metalic nemagnetic între două straturi magnetice. Primul strat magnetic de spin polarizează curentul într-o anumită direcție. Al doilea strat magnetic își schimbă proprietățile magnetice înainte și înapoi pentru a se potrivi cu câmpul care vine din fiecare domeniu magnetic care trece reprezentând un 0 sau un 1 pe un disc. Atunci când cele două straturi magnetice ale sensorului sunt paralele, curentul spin-polarizat trece prin ele relativ ușor. Când straturile sunt antiparalele, electronii polarizați sunt împiedicați. Rezistența de schimbare a dispozitivului este cunoscută sub numele de magnetorezistență gigant, un fenomen descoperit în mod independent, în 1988, de către grupurile lui Albert Fert de la Universitatea din Paris-Sud și Peter Grünberg de la Centrul de Cercetare Jülich din Germania. Magnetorezistența gigant permite capetelor de citire să detecteze câmpuri mult mai slabe, care, la rândul lor, permit domeniilor magnetice de pe un disc să fie mult mai mici și mai bine ambalate.

### 3. Călcâiul lui Ahile

Fiecare tip de stocare a datelor are propriul "călcâi al lui Ahile", și din acest motiv calculatoarele folosesc mai multe tipuri, în funcție de scopurile urmărite. Cele mai multe date digitale de astăzi, cum ar fi informațiile care alcătuiesc Internetul, sunt conținute în vaste "ferme" de drive-uri magnetice pe hard disk (HDD) și în HDD-urile computerelor personale (PC-uri). Cu toate acestea, unitățile de memorizare a datelor, cu rotirea lor de discuri și cu deplasarea capetele de scriere/citire, nu sunt fiabile și sunt lente. Pierderea de date din cauza așa-numitelor accidente de cap apare relativ frecvent.

În ceea ce privește viteza, aceasta poate ajunge până la 10 milisecunde pentru a citi primul bit al unor date solicitate. Pentru calculatoare, 10 milisecunde este enorm, căci un procesor modern poate efectua 20 de milioane de operații în acest timp. De aceea, computerele utilizează un al doilea tip de stocare, memoriile solid-state, pentru operațiunile lor de calcul; memoriile solid-state citesc și scriu date cu viteză mare și permit prelucrarea lor rapidă. Versiunile de înaltă performanță, cum ar fi memoria statică și dinamică cu acces aleatoriu (SRAM și respectiv DRAM), utilizează tranzistoare și condensatoare pentru a stoca biți de date (fig. 1).

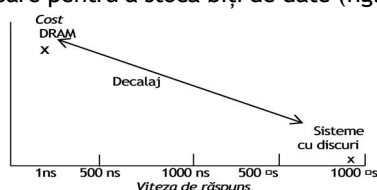


Figura 1 Comparare între performanțele memoriei DRAM și ale unității de discuri

Aceste cipuri își pierd, totuși, datele lor, în cazul în care competențele informatice dispar sau se blochează. Câteva computere folosesc cipuri nevolatile, care păstrează datele atunci când dispozitivul este fără tensiune, cum ar fi o unitate SSD în locul unui HDD. Omniprezentele telefoane mobile inteligente și alte dispozitive portabile folosesc, de asemenea, memorii nevolatile, dar există un compromis între cost și performanță. Cea mai ieftină memorie nevolatilă este memoria flash, dar ea este lentă și nesigură în comparație cu alte cipuri de memorie. De fiecare dată când pulsul de înaltă tensiune ("flash-ul" care i-a dat numele) scrie o celulă de memorie; celula se deteriorează și devine inutilizabilă după doar 10.000 de operații de scriere. Cu toate acestea, din cauza costului redus, memoria flash a devenit o tehnologie dominantă de memorie, în special pentru aplicații în care datele nu vor fi schimbate foarte des.

Lumea calculului cere, prin urmare, un cip de memorie cu densitate mare de date, care să fie ieftină, fiabilă, rapidă, sigură și nevolatilă. Cu o astfel de memorie, dispozitivele de calcul ar deveni mult mai simple și mai mici, mai fiabile, mai rapide și mai puțin consumatoare de energie. Grupuri de cercetători din întreaga lume investighează mai multe abordări pentru a face față acestei cereri, inclusiv sisteme bazate pe noile componente electronice numite memristoare, dar și pe altele care utilizează spintronica, unde spinul sau magnetismul electronilor joacă o rol-cheie.

Răspunsul îl dă un nou tip de cip spintronic numit memorie tip circuit de cursă (*racetrack memory* RM), propusă de dr. Parkin, în 2002. Ea stochează biți de date ca regiuni magnetizate pe nanosârme-circuite de cursă. Aceste regiuni sunt magnetizate și nevolatile, reinscriptibile ca cele de pe un HDD, iar cipul nu are nevoie de piese în mișcare mai mari decât un electron pentru a citi și a scrie biți, măbind astfel viteza și fiabilitatea dispozitivului. Biții înșiși se deplasează de-a lungul circuitului lor de cursă și trec prin fața unui cap de citire/scriere, fixat lângă sârmă.

### 4. Situația actuală

Stagnarea actuală a purtătorilor de date se datorează naturii materialelor de stocare: Biții de pe un hard disk sunt regiuni magnetice. Magnetizarea, într-o direcție, este citită de calculator drept "unu", iar în cealaltă direcție, "zero". Pentru magnetism și orientarea lui sunt responsabili atomii individuali ai materialului. Fiecare atom acționează aici ca un magnet infinit de mic. Foarte mulți atomi trebuie să fie aliniați împreună și unul împotriva celuilalt. Împreună, ei formează o unitate magnetică minusculă de bază - un domeniu magnetic.

Biții magnetici nu pot fi oricât de mici: Sub o anumită dimensiune, lipsește stabilitatea efectului de grup, magnetizarea fluctuează în mod constant și incontrollabil. Informațiile pe care le au biții de memorie magnetică, se pierd imediat.

Cu materiale magnetice mai stabile, biții pot fi micșorați și mai mult. Aceasta ridică însă următoarea problemă: Capetele curente de citire și scriere ale hard disk-urilor vor consuma mai multă energie pentru a scrie biți. Iar la dimensiunile pe care le au sistemele actuale, nu este deloc ușor.

Toate dispozitivele actuale de stocare a datelor au avantaje și inconveniente. De aceea se folosesc diferite tipuri, în funcție de necesități.

Astăzi, majoritatea datelor numerice este stocată pe discuri dure magnetice HDD (*hard disk drive*), pe servere sau în computere personale PC (fig. 2).

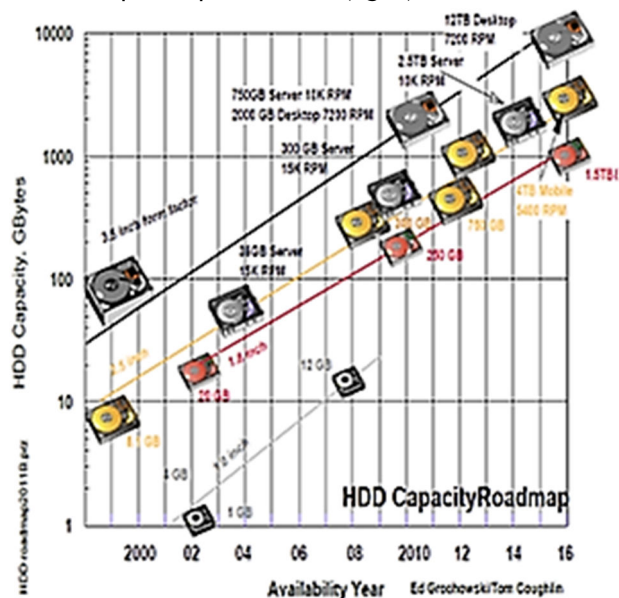


Figura 2. Drumul parcurs de discurile dure, de la începuturi și până azi [12;16]. Situația îmbunătățirilor realizate în cursul ultimei decade: Viteza CPU a crescut de 8...10 ori; cea a memoriilor DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) de 7...9 ori; cea a rețelei de cca 100 ori; cea a busului de 20 ori; însă viteza unității de discuri n-a crescut decât de 1,2 ori

Însă aceste dispozitive - alcătuite dintr-un cap de lectură/scriere suspendat deasupra unui disc în rotație - sunt lente și puțin fiabile. Defecțiunile și pierderile de date sunt destul de frecvente și trebuie să așteptăm până la 10 ms înainte ca primul bit de date să poată fi citit. În același interval de timp, un microprocesor modern poate efectua 20 milioane operații.

De fapt, computerele utilizează, pentru calcule și pentru toate sarcinile în curs de prelucrare, un alt tip de memorii de acces mai rapide (numite memorii vii) cum sunt memoriile statice (SRAM) sau dinamice (DRAM). Ele sunt memoriile SSD (*solid state drive*), așadar fără piese mobile, pe bază de semiconductoare, în care sunt stocate datele sub formă electronică în și condensatoare. Lectura și scrierea datelor în memoriile SSD se fac mult mai rapid decât cu discuri dure. În schimb, memoriile SRAM și DRAM sunt volatile (documentele sunt șterse automat de îndată ce se taie alimentarea).

"Părțile mobile sunt pur și simplu o problemă", spune Parkin. "O defectare afectează catastrofal fiabilitatea." De aceea Parkin vrea să elimine capul de citire-scriere, cu toate că el însuși a contribuit în trecut la perfecționarea acestuia. Chiar și înainte de descoperirea așa-numitei magnetorezistențe gigant, Parkin a găsit o utilizare pentru acest efect fizic: În 1997 el a folosit principiul pentru a face capetele de citire neregulat sensibile; biții magnetici pot fi astfel semnificativ mai mici. Între timp, în capetele de citire se află dezvoltarea viitoare: Datorită efectului de mecanică cuantică al contactelor tunel magnetice, ele au devenit, din nou, mai sensibile.

Desigur, medii de stocare electronică sunt deja utilizate în prezent ca o alternativă la hard disk: discuri solid-state - bazate pe memoria flash, pe scurt SSD-uri. Aici miliarde de tranzistori minusculi servesc ca biți. Și de aceea prețul pentru un bit este mult mai scump decât la discurile magnetice. În plus, astfel de biți electronici nu sunt la fel de des reinscriptibili. Pe scurt, epoca de discului magnetic este încă departe de a apune. Mai ales pentru centrele mari de date și furnizorii de memorii de stocare cloud.

## 5. Memoria racetrack [11-19]

Memoria "tip circuit de cursă" a lui Parkin este alcătuită din fire nanometrice subțiri, de material magnetic. În ele stau biții magnetici, unii în spatele celorlalți, ca niște perle pe ață. Senzorul care citește biții este fix, așezat transversal. Nu există piese în mișcare. Structura magnetică este deplasată înainte și înapoi în nanofire. Biții migrează către senzor, fără ca firul să se miște.

"De fapt, pereții de domeniu se mișcă", spune Parkin. Ținta mișcării sunt aceste granițe între doi biți. Electronii sunt trimiși prin fir - și curge astfel un curent electric. Caracteristică specială: Este vorba de electroni polarizați al căror propriu spin magnetic este orientat corect. Având în vedere că spinul este un moment unghiular și conservarea momentului unghiular este valabilă pentru întregul sistem, acești electroni manipulează pereții de domeniu, deplasându-i înainte și înapoi. "În cele din urmă, efectul este ca și când biții magnetici s-ar mișca înainte și înapoi." (fig. 3).

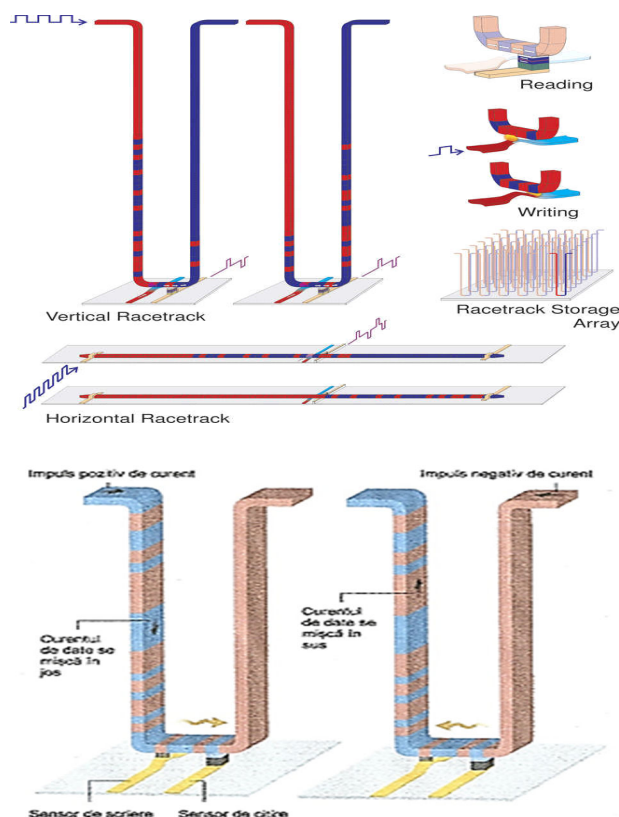


Figura 3. Diagrama momentelor importante ale unei nanosârme ne arată modul în care, cu ajutorul unui curent electric, nano-elemente magnetice vor alergera "în circuit de cursă" și, prin urmare, vor permite datelor să fie scrise sau citite în mai puțin de o nanosecundă [11]

La racetrack (memoria tip circuit de cursă), pereții despărțitori dintre domeniile magnetice (unde sunt stocate datele digitale) se deplasează ca pe o pistă de curse, datorită nanosârmelor din material magnetizabil. Pereții mobili se pot utiliza astfel ca un fel de registru de deplasare magnetică pentru stocarea biților de date.

La racetrack (memoria tip circuit de cursă), pereții despărțitori dintre domeniile magnetice (unde sunt stocate datele digitale) se deplasează ca pe o pistă de curse, datorită nanosârmelor din material magnetizabil. Pereții mobili se pot utiliza astfel ca un fel de registru de deplasare magnetică pentru stocarea biților de date. Memoria Racetrack stochează datele digitale în pereții domeniului magnetic al nanosârmei. Această tehnologie promite obținerea de dispozitive de stocare a informațiilor cu fiabilitate, performanțe și capacitate ridicate.

Cipul de memorie tridimensional (*racetrack storage array* din fig. 3) constând din șiruri de piste verticale de circuit cursă pe siliciu pot atinge densități de date mai mari decât cele ale unei unități de hard disk, fără a avea nevoie de piese mecanice în mișcare. Memoria tip circuit de cursă este o nanosârmă pe care sunt deplasate datele. Un bit este stocat pe nanosârmă alături de alții și ei trebuie deplasați către stația fixă de citire/scriere pentru a putea fi citiți. Capacitatea mare de stocare se datorează faptului că, spre deosebire de HDD, memoria nu este limitată la două dimensiuni, ci utilizează și a treia dimensiune, pentru a stoca mai multă memorie pe aceeași suprafață. O altă proprietate a memoriei tip circuit de cursă este că nu se uzază, ceea ce ar putea permite stocarea fiabilă de date pe termen lung, în deplină siguranță.

Încă în anul 2011, Parkin și colegii săi au prezentat un prototip racetrack cu 256 de nanosârme ale căror date puteau fi scrise și citite. Parkin și echipa sa au cercetat și nanosârme, în care cobalt-nichel-cobalt au fost depuse într-o structură cu succesiune în sandwich. În general, sandwichul a avut o înălțime de doar zece straturi atomice, astfel încât sârma avea o grosime mai mică de un nanometru. Cercetătorii au reușit să miște extrem de rapid domeniile magnetice de-a lungul acestui fir, astfel încât memoria să poată purta eticheta Racetrack.

Curenții induși în pereții domeniului magnetic (domain walls DW) de mișcarea nanosârmelor magnetice prezintă o nouă abordare pentru a stoca și a transmite date. Prin combinarea cu joncțiunea tunel magnetică (magnetic tunnel junction MTJ) nanocoloanele memoriei Racetrack se realizează o nouă clasă de memorii nevolatile, datorită capacității sale importante de stocare și de acces rapid la date. Cu toate acestea, este nevoie de un curent relativ important care să parcurgă nanosârma pentru a deplasa pereții domeniului magnetic. Acest lucru conduce la o mare provocare pentru proiectarea circuitelor de integrare și a arhitecturii necesare pentru RM, dincolo de nivelul de cercetare al dispozitivului. S-a constatat astfel că rezistivitatea materialului nanosârmei este un parametru foarte critic pentru proiectarea RM. În lucrarea [13], este prezentată proiectarea memoriei cu circuit de cursă, ținând cont de perspectivele fizice ale mișcării peretelui de domeniu magnetic în nanosârmă.

Cipurile de memorie nevolatilă Racetrack vor avea capacitatea discurilor dure, însă durabilitatea și performanțele lor vor fi cele ale discurilor flash NAND, pe care le vor înlocui. Memoria folosește curenți electrici sau

curenți de spin pentru a deplasa electronii. O nanosârmă are o lățime de 240 nm și o grosime de 20 nm. Curenții de spin manipulează starea magnetică - la scară nanomagnetice - din regiunea pereților domeniului magnetic din nanosârme. Fiecare nanosârmă reprezintă o "celulă" und sunt stocați electronii. Cipul IBM este compus din 256 celule Racetrack; în testele de laborator efectuate de IBM, ale căror rezultate au fost publicate în revista Science [11], viteza intrare/ieșire s-a situat aproape de cea a memoriilor DRAM. Primul circuit de memorie Racetrack a fost integrat cu tehnologia CMOS, pe plachete de 8 zoli.

Ca inventator al unei tehnologii magnetice, care a înmăit capacitatea hard disk-ului de calculator, dr. Stuart Parkin a făcut mai mult decât oricine pentru a mări capacitatea ordinarilor de a stoca mari cantități de informații digitale. Aceasta explică de ce lui Parkin, un fizician britanic care lucrează în SUA și Germania, i s-a decernat, în 2014, premiul "Millennium Tehnology Price" în valoare de 1 milion Euro pentru munca depusă între sfârșitul anilor 1980 și 1990, pentru exploatarea științei în curs de dezvoltare "spintronică" și pentru punerea la punct a unui nou tip de stocare magnetică, care stă la baza infrastructurii de calcul a secolului 21 (servicii de tip cloud, rețele sociale și de divertisment on-line). HDD-urile magnetice folosind spintronica pot stoca cantități mari de date, dar ele se bazează pe discuri rotative și capete de citire/scriere care se deplasează, ceea ce le face - în mod intrinsec - mai lente, consumând intensiv mai multă energie și fiind mai puțin fiabile decât și-ar dori industria. Memorii alternative care nu sunt în mișcare, cum ar fi cipurile solid-state și memoriile flash, au utilizările lor, dar le lipsește viteza și integritatea necesară pentru accesul rapid la stocarea a datelor în masă. Cu memoriile "tip circuit de cursă" apare o tehnologie care ar putea fi ieftină, rapidă, fiabilă, durabilă și cu consum redus de energie. Din momentul în care Parkin a propus "circuitul de cursă", în 2002, el a lucrat cu colegii de la IBM - dar și în altă parte - pentru a face din propunerea lui o realitate. El spune: "Ar putea deveni un produs comercial în termen de cinci până la șapte ani." Tehnologia Racetrack folosește, de asemenea, spintronica, dar într-o formă compactă, care nu are nevoie de o sursă de energie electrică pentru a menține datele; stochează biți digitali în regiuni magnetizate, extrem de mici, pe nanofire - altfel spus, în circuite de cursă. În timp ce toate dispozitivele de stocarea datelor de astăzi sunt discuri sau cipuri 2D (în două dimensiuni), memoria tip circuit de cursă este un dispozitiv 3D cu nanofire construite ca niște coloane verticale care cresc ca o pădure, pe un cip de siliciu. "Construirea în trei dimensiuni ne oferă o creștere enormă a densității de stocare", spune Parkin. "Putem mări capacitatea de memorie înmăit, fără a crește costurile." Regiunile magnetizate fac curse înainte și înapoi în dreptul capetelor fixe de citire/citire. Diferența esențială față de unitățile de disc de astăzi este faptul că mediul magnetic, în sine, nu se mișcă. În schimb biții înșiși călătoresc în dreptul capetelor, antrenati de un curent electric minuscul, reducând astfel foarte mult energia necesară pentru funcționarea dispozitivului. Când aparatul este oprit, domeniile magnetice pot păstra starea lor de spin pe termen nelimitat. Circuitul "de cursă" nu este singura contribuție a lui Parkin la viitorul stocării informațiilor în computere. El lucrează și la alte

tehnologii, cum ar fi vârtejuri de particule magnetice numite "skyrmioni". Dacă el va reuși, pe la sfârșitul anilor 2020 vom vorbi de omul care a îmbunătățit stocarea datelor cu un factor de milioane.

## 6. Caracteristicile cipurilor de memorie

Memoria este constituită din circuite care au o multitudine de biți aliniați unul după altul, în mod succesiv, ca niște perle pe o ață. Pentru noua memorie Parkin a folosit un fir subțire de metal, prin care alunecă regiuni magnetice, cu viteze de până la 200 de metri pe secundă, ceea ce corespunde unui timp de citire de câteva zeci de nanosecunde. Cel mai mare avantaj al acestei metode este capacitatea superioară de stocare. Biții sunt stocați în mod individual. Ei se mișcă unul în spatele celuilalt și se succed în lungul aceleiași nanosârme. Dacă îi înșirăm, ca mărgelile pe ață, pe nanosârme extrem de subțiri, spune Parkin, ei ar putea să bată recordul de memorie al unui hard disk modern. Cu toată concurența memoriilor PCRAM sau RRAM, Racetrack va câștiga cursa împotriva memoriei flash, așa încât epoca flash se va încheia curând.

### Caracteristici principale

- Soluție de tip magnetic pe nanosârme (nanofire)
- Material: Permalloy (aliaj FeNi)
- Lucrează în domeniul nanosecunde
- Aproape nici un consum de energie
- Tehnologia cipului: tri-dimensională
- 100 de biți pe o nanosârmă, mai multe milioane de sârme pe cip
- Capacitate de 100...1000 ori mai mare decât cea a memoriilor flash

Toate acestea sunt factori posibili de dezvoltare, în viitor, a capacității potențiale a diverselor tipuri de memorii, în comparație cu memoriile flash de astăzi (factorul 1)

flash 1 → 4  
ML-PCM 4 → 40  
STT-RAM 10 → 60  
Racetrack 60 → 1000

## 7. Concepte-cheie

- Un design radical nou pentru stocarea de date informatice numit memorie circuit de cursă (*racetrack memory* RM) deplasează biți magnetici de-a lungul nanoscopicului "circuit de cursă."
- RM va fi nevolatilă și nu are dezavantajele unităților de hard disk sau ale actualelor cipuri nevolatile.
- Cipuri cu circuite de cursă orizontale va putea elimina memoriile nevolatile "flash" de astăzi. Construirea de "păduri" de circuite de cursă verticale pe un substrat de siliciu va genera cipuri de memorie tridimensionale cu o densitate de stocare a datelor care depășește pe cea a hard disk-urilor.
- RM este superioară mai multor altor noi tipuri de memorie în curs de dezvoltare.

## 8. Caracteristicile RM

- Un registru de deplasare controlat de curent.
- Nevolatilă
- Densitate mare de stocare a datelor

- Mult mai rapidă decât HDD și DRAM
- leftină
- Fără părți mecanice în mișcare, așadar fără uzură
- Tridimensională

### Biții

- Folosesc ca material permalloy  $Ni_{81}Fe_{19}$  [un aliaj feromagnetic moale, cu permeabilitate magnetică foarte ridicată (de 100 ori cea a oțelului)] sub forma unei nanosârme.
- Domeniile magnetice sunt separate de pereții de date (*data walls* DW) și conduc către regiuni de tranziție între domeniile magnetice ale structurii; ele sunt definite de geometria dispozitivului.
- Simularea dinamicii de magnetizare care are loc în permalloy se face cu ajutorul ecuației Landau-Lifschitz.

## 9. References

- [1] C. Chappert, et al., "The emergence of spin electronics in data storage," *Nature Materials*, Dec. 2007.
- [2] J. C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159(1-2): L1-L7, 1996. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885396000625](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885396000625)
- [3] L. Berger, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current," *Phys. Rev. B*, 54 :9353-9358, Oct. 1996. [link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.54.9353](http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.54.9353)
- [4] J. A. Katine, F.J. Albert, R.A. Buhrman, E. B. Myers, and D. C. Ralph, "Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in  $Co/Cu/Co$  pillars," *Phys. Rev. Lett.*, 84 :3149-3152, Apr 2000. [link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.3149](http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.3149)
- [5] M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, and P. Wyder, "Excitation of a magnetic multilayer by an electric current," *Phys. Rev. Lett.*, 80 :4281-4284, May 1998, [link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.80.4281](http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.80.4281)
- [6] M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, V. Tsoi, and P. Wyder, "Generation and detection of phase-coherent current-driven magnons in magnetic multilayers," *Nature*, 406 :46-48, 2000, [dx.doi.org/10.1038/35017512](http://dx.doi.org/10.1038/35017512)
- [7] J. Grollier, P. Boulenc, V. Cros, A. Hamzić, A. Vaurès, A. Fert, and G. Faini, "Switching a spin valve back and forth by current-induced domain wall motion," *Applied Physics Letters*, 83(3):509-511, 2003. [link.aip.org/link/APL/83/509/1](http://link.aip.org/link/APL/83/509/1)
- [8] J.A. Katine and E.E. Fullerton, "Device implications of spin-transfer torques," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(7) :1217-1226, 2008, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885307010189](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885307010189)
- [9] S.I. Kiselev, J.C. Sankey, I.N. Krivorotov, N.C. Emley, R.J. Schoelkopf, R.A. Buhrman, and D.C. Ralph, "Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current," *Nature*, 425:380-383, 2003, [dx.doi.org/10.1038/nature01967](http://dx.doi.org/10.1038/nature01967)
- [10] W.H. Rippard, M.R. Pufall, S. Kaka, S.E. Russek, and T.J. Silva, "Direct-current induced dynamics in  $Co_{90}Fe_{10}/Ni_{80}Fe_{20}$  point contacts," *Phys. Rev. Lett.*, 92:027201, Jan 2004. [link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.027201](http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.027201)
- [11] Stuart S. P. Parkin, Masamitsu Hayashi, and Luc Thomas. Magnetic domain-wall racetrack memory. *Science*, 320(5873) :190-194, 2008. [www.sciencemag.org/content/320/5873/190.abstract](http://www.sciencemag.org/content/320/5873/190.abstract)
- [12] K. Gereke, "IBM Storage," [konferenz-nz.dlr.de/pages/storage2014/present/1.0Konferenztag/12\\_06\\_2014\\_02\\_IBM.pdf](http://konferenz-nz.dlr.de/pages/storage2014/present/1.0Konferenztag/12_06_2014_02_IBM.pdf)
- [13] N. Ben-Romdhane et al., "Design and Analysis of Racetrack Memory Based on Magnetic Domain Wall Motion in Nanowires," *Proc. IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures (NANOARCH'14)*, 71-76.
- [14] B. Schwan, "Racetrack-Memory in konventioneller Fertigung," [heise online](http://heise online), 7.11.2011
- [15] M.L. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner, S.S.P. Parkin, "Current-Controlled Magnetic Domain-Wall Nanowire Shift Register," Vol. 320(2008), Nr. 5873, S. 209-211.

- [16] K. Gerecke, K. Poschke, *IBM System Storage-Kompendium. Die IBM-Speichergeschichte von 1952-2010*, IBM Corporation, 2010.
- [17] \*\*\* Les mémoires racetrack, *Pour la Science*, N° 383 - sept. 2009.
- [18] Stuart Parkin, See-Hun Yang, "Memory on the racetrack," *Nature Nanotechnology*, March 2015, 195-198.
- [19] S. Parkin, "Artificially atomically engineered materials for storage and cognitive computing applications," [ibbr.umd.edu/sites/default/files/public\\_page/StuartParkinPlenary520MGI-Summit\\_NSF.pdf](http://ibbr.umd.edu/sites/default/files/public_page/StuartParkinPlenary520MGI-Summit_NSF.pdf)

## Biography



Titu-Marius I. BĂJENESCU was born in Câmpina (Romania) on April 2, 1933.

He received his engineering training at the Polytechnic Institute Bucharest.

He served for the first five years in the Romanian Army Research Institute, including tours on radio and telecommunications maintenance, and in the

reliability, safety and maintainability office of the Ministry of Defence (main base ground facilities).

**R&D Experience:** design and manufacture of experimental equipment for Romanian Army Research Institute and for air defence system.

He joined Brown Boveri (today: ASEA Brown Boveri) Baden (Switzerland) in 1969, as research and development engineer.

**R&D Experience:** design and manufacture of new industrial equipment for telecommunications.

In 1974, he joined Hasler Limited (today: Ascom), Berne, as Reliability Manager (recruitment by competitive examination).

**Experience:** Set up QRA and R&M teams. Developed policies, procedures and training. Managed QRA and R&M programmes. As QRA Manager monitoring and reporting on production quality and in-service reliability.

As Switzerland official, contributed to development of new ITU and IEC standards.

In 1981, he joined "Messtechnik und Optoelektronik" (Neuchâtel, Switzerland, and Haar, West Germany), a subsidiary of Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) Munich, as Quality and Reliability Manager (recruitment by competitive examination).

**Experience:** Product Assurance Manager of "intelligent cables". Managed applied research on reliability (electronic components, system analysis methods, test methods, etc.).

Since 1985, he has worked as an independent consultant and international expert on engineering management, telecommunications, reliability, quality and safety.

Mr. Băjenescu is the author of many technical books published in English, French, German and Romanian.

He is university professor and has written many papers and articles on modern telecommunications, and on quality and reliability engineering and management. He lectures as an invited professor, visiting lecturer or speaker at European universities and other venues on these subjects.

Since 1991, he won many Awards and Distinctions, presented by the Romanian Academy, Romanian Society for Quality, Romanian Engineers Association, etc. for his contribution to reliability science and technology.

Recently he received the honorific titles of *Doctor Honoris Causa* of the *Romanian Military Academy* and from *Technical University of the Republic of Moldavia* (Chişinău).

In 2013, he obtained, together with prof. Marius Băzu (head of reliability laboratory of Romanian Research Institute for Micro- and Nanotechnologies IMT) - the "*Tudor Tănăsescu*" prize of the *Romanian Academy* for the book *Failure Analysis*, published by John Wiley & Sons.

e-mail: [ymbajenesco@bluewin.ch](mailto:ymbajenesco@bluewin.ch)