

Informatica cuantică

Studiu de specialitate

1. Introducere

În informatica clasică, cea a calculatoarelor, software-ului și telecomunicațiilor de astăzi, codarea și tratarea informației sunt concepute pe baze ce se sprijină în întregime pe fizica clasică. Chiar dacă în procesul de concepere al tranzistorilor nu putem evita luarea în calcul a unor fenomene specifice prezente la scară cuantică, aceste fenomene sunt mai degrabă evitate decât exploatate, scopul final fiind de a obține un comportament macroscopic. Mai mult, o trecere în revistă a informaticii clasice relevă că până și modelele teoretice fundamentale, ca mașina Turing și calculul lambda, sunt construite plecând de la ipoteze implicite - niciodată enunțate - conform cărora prelucrarea și comunicarea informației sunt bazate, în esența lor, pe fizica clasică.

Evoluția tehnologiilor actuale ne permite să prezicem că, în următorii douăzeci de ani, elementul de bază al informației binare - bitul - va putea fi implementat la scară atomică. Vom putea, de exemplu, să utilizăm spinul $-1/2$ al unei particule, sau polarizarea verticală sau orizontală a unei particule, sau chiar nivelul de energie al unui electron într-un atom de hidrogen: toate acestea oferă diferite posibilități de a coda stările de bază 0 și 1. La acest nivel, legile fizicii clasice încetează de a se mai aplica, lăsând loc celor aparținând fizicii cuantice care, câteodată, nu sunt foarte compatibile cu intuiția noastră. Pentru a obține densități de 10^{16} porți pe chip și frecvențe, probabil, mai mari de 10^{15} Hz - performanțe prevăzute pentru anul 2020 în cazul unei evoluții "normale" - trebuie adoptate modele teoretice, bazate fundamental și explicit pe legile fizicii cuantice. În loc de a "corija" efectele cuantice, va trebui să le exploatăm, în contextul în care prin însăși natura lor pot să furnizeze o putere de calcul încă nebănuită.

2. Qubit

În informatica clasică un bit poate avea două valori: 0 sau 1. În informatica cuantică, aceste stări 0 și 1 iau forma a doi vectori ortogonali, unul notat $|0\rangle$ iar celălalt $|1\rangle$ (notația lui Dirac: a se pronunța „ket zero” și „ket unu”, pentru că există de asemenea $\langle 0|$ și $\langle 1|$, „bra zero” și „bra unu”, astfel încât

$\langle x|y\rangle$, care capătă semnificația produsului scalar, să se poată pronunța „braket”). Un bit cuantic, numit qubit (quantum bit) poate deci fi într-una din stările $|0\rangle$ sau $|1\rangle$. Dar un qubit se poate găsi de asemenea, conform principiilor mecanicii cuantice, într-o stare care este o superpoziție coerentă a acestor două stări de bază. Pentru un qubit, această superpoziție ia de asemenea forma unui vector (în fizica cuantică vorbim despre funcții de undă) ce evoluează într-un spațiu cu două dimensiuni. Acest vector poate fi exprimat ca o combinație liniară a celor două stări $|0\rangle$ și $|1\rangle$ ale bazei ortogonale:

$$c_0 |0\rangle + c_1 |1\rangle$$

Însă atenție, coeficienții c_0 și c_1 sunt numere complexe deoarece, în fizica cuantică, la inițiativa lui von Neumann, vectorul de stare evoluează într-un spațiu Hilbert. Coeficienții sunt numiți amplitudini de probabilitate și sunt astfel încât $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$.

Putem sugera o intuiție parțială - dar fidelă realității - a rolului coeficienților c_0 și c_1 . În informatica cuantică, contrar unei impresii care își are probabil originea într-o interpretare pripită a fizicii cuantice, calculele sunt complet deterministe. Probabilitățile intervin doar în momentul în care vrem să cunoaștem rezultatul unui calcul, adică suntem puși în situația de a observa ("a măsura" ar zice mai degrabă un fizician) o stare din lumea cuantică pentru a putea mai apoi extrage o valoare lizibilă în lumea clasică. Astfel, dacă un qubit în starea $c_0 |0\rangle + c_1 |1\rangle$ este rezultatul unui calcul cuantic, această stare trebuie interpretată ca și cum stările $|0\rangle$ și $|1\rangle$ ar fi efectiv obținute - amândouă în același timp - ca rezultate ale acestui calcul. Măsurarea acestui rezultat, în concordanță cu legile cuantice, are ca urmare fie (cu o probabilitate $|c_0|^2$) reducerea rezultatului la vectorul $|0\rangle$ pierzând ireversibil orice informație asupra faptului că 1 fusese de asemenea obținut ca valoare a acestui rezultat, fie (cu o probabilitate $|c_1|^2$) reducerea la vectorul $|1\rangle$ având ca urmare citirea valorii 1 și pierderea oricărei informații privitoare la prezența lui 0 în componenta rezultatului obținut.

Vom vedea că amplitudinile de probabilitate permit folosirea, în cursul unui calcul, a unor fenomene de interferență care, în momentul observării unei superpoziții cuantice, vor crește sau - din contră - vor diminua probabilitatea de a obține anumite valori.

3. Registru cuantic

Un sistem de n qubiți constituie un registru cuantic de mărime n . Să luăm spre exemplu cazul unui registru de mărime 3. Fiecare din cei trei qubiți ai registrului evoluează într-un spațiu cu două dimensiuni, fiecare având propria sa bază de forma $\{|0\rangle, |1\rangle\}$:

$$c_{10} |0\rangle + c_{11} |1\rangle$$

$$c_{20} |0\rangle + c_{21} |1\rangle$$

$$c_{30} |0\rangle + c_{31} |1\rangle$$

Conform principiilor fizicii cuantice, registrul - în ansamblul său evoluează - într-un spațiu cu 8 dimensiuni (care este produsul tensorial al celor trei spații Hilbert cu două dimensiuni), și pentru care cea mai "naturală" bază este constituită de 8 vectori de stare pe care îi vom nota, pentru simplificare, cu $|000\rangle$, $|001\rangle$, $|010\rangle$, $|011\rangle$, $|100\rangle$, $|101\rangle$, $|110\rangle$ și $|111\rangle$. Consecință: starea registrului nostru de 3 qubiți este, în general, o superpoziție a acestor 8 stări de bază, fiind exprimată printr-un vector de forma:

$$c_{000} |000\rangle + c_{001} |001\rangle$$

$$c_{010} |010\rangle + c_{011} |011\rangle$$

$$c_{100} |100\rangle + c_{101} |101\rangle$$

$$c_{110} |110\rangle + c_{111} |111\rangle$$

Astfel, în timp ce un registru clasic pe 3 biți nu poate conține la un moment dat decât una din cele 8 valori posibile, un registru cuantic pe 3 biți poate conține *simultan* cele 8 valori, într-o superpoziție cuantică coerentă. De o manieră generală, un registru cuantic de mărime n evoluează într-un spațiu cu 2^n dimensiuni și conține, în orice moment, o superpoziție cuantică a celor 2^n valori posibile. În informatica cuantică, numărul de valori diferite pe care le putem suprapune și prelucra simultan crește exponențial în funcție de mărimea fizică a sistemului.

Calculul este efectuat prin intermediul anumitor operatori care transformă starea curentă. Până aici, nimic deosebit. Dar suntem într-un domeniu unde domnesc legile fizicii cuantice: operatorii nu pot, deci, opera decât în conformitate cu aceste legi, iar compunerea lor nu trebuie în nici un caz să violeze aceste legi. Cum stările iau forma unor vectori, acești operatori vor lua în mod natural forma unor matrice (cu coeficienți complecși din moment ce operează într-un spațiu Hilbert). Fizica cuantică ne impune ca fiecare operator dat să fie unitar, adică reprezentat printr-o matrice U astfel încât $UU^* = U^*U = I$, unde U^* este transpusa conjugatei lui U , iar I matricea unitate. Cu alte cuvinte, dacă U este o matrice unitară, atunci $U^{-1} = U^*$. Acest lucru este esențial deoarece consecința este că fiecare operator - și, prin urmare, fiecare calcul - este reversibil, adică întotdeauna putem regăsi datele inițiale plecând de la rezultate.

4. Porți cuantice

Pentru ca aceste proprietăți foarte interesante ale sistemelor cuantice să nu rămână doar simple curiozități, avem nevoie de un mijloc concret de acțiune asupra unui sistem de qubiți astfel încât modificările suferite de către informația conținută în acest sistem, să fie controlabile. Trebuie subliniat că termenul control își pierde sensul clasic și semnifică mai degrabă a avea garanția că rezultatul dorit va

putea fi măsurat cu o probabilitate mai mare de 50 %. În acest sens, există mai multe abordări ale acestei probleme, cele mai des întâlnite fiind porțile cuantice, conceptul de mașină Turing cuantică și automatele celulare. În continuare vom prezenta prima din aceste abordări.

Ca și porțile logice clasice, porțile cuantice au ca intrări un număr oarecare de qubiți; însă diferența este că la ieșirea acestor porți, numărul de "fire" va fi întotdeauna egal cu numărul de fire la intrare (condiție impusă de reversibilitatea calculului). Porțile cuantice nu mai sunt o modalitate de a calcula o valoare logică, ci mai degrabă o modalitate de a modifica o informație al cărui "depozit", sistemul cuantic, rămâne totdeauna același. Lăsând la o parte pentru început aspectele matematice, ne putem imagina informația cuantică "circulând" pe un număr de fire egal cu dimensiunea registrului cuantic și pe care porțile cuantice apar ca filtre ce modifică valorile anumitor fire, în cea mai mare parte a cazurilor (porți pe mai mulți biți) în funcție de conținutul altora. (fig 1.) O succesiune de porți cuantice (și deci de operații asupra datelor) reprezintă un program cuantic.

Regăsim cu ușurință același principiu al secvenței de operații prezent în programarea procedurală. Diferența esențială este că, având pe aceste fire o superpoziție a tuturor valorilor reprezentabile într-un registru cuantic, efectuăm calcule simultane asupra tuturor acestor valori.

Putem porni de la un set elementar de porți cuantice pe un bit. În acest sens, exemplul unei porți NOT este destul de intuitiv. Am notat mai jos Q_i valoarea inițială a unit qubit, iar NOT Q_i reprezintă noua valoare după aplicarea unui filtru NOT.

$$\begin{array}{c}
 Q_i = a|0\rangle + b|1\rangle \\
 \begin{array}{cc}
 \downarrow & \downarrow \\
 \text{NOT } Q_i = a|1\rangle + b|0\rangle = b|0\rangle + a|1\rangle
 \end{array}
 \end{array}$$

Un aspect esențial este că NOT-ul cuantic nu înseamnă o inversare a valorilor componentelor. Fundamentul matematic ce stă la bază porților cuantice este rotația vectorilor ce formează bază spațiului vectorial al sistemului cuantic. Cum în cazul lui NOT avem o simetrie față de prima bisectoare, rezultatul este interschimbarea valorilor pe fiecare axă. În aceeași clasă, a porților pe 1 bit, putem întâlni porți pentru operații uzuale cum ar fi funcția identică, dar și operații care depășesc intuiția clasică cum ar fi poarta Hadamard (transformă a doua componentă într-o superpoziție de componente inițiale) sau chiar porți cu comportament bizar cum ar fi "radical din NOT".

Între porțile pe mai mulți biți există o poartă - numită C-NOT (sau poarta Toffoli) - care prezintă un interes special. Un C-NOT clasic pe doi biți neagă al doilea bit în cazul în care primul este 1.

Varianta cuantică efectuează această operație asupra fiecărei componente a sistemului de qubiți la fel ca în cazul porții NOT prezentată anterior. În varianta generalizată a acestei porți, avem un număr n de biți de control al căror AND poate schimba cel de al $n+1$ - lea bit. Convenția general uzitată pentru reprezentarea unei porți C-NOT este cea din figura 2.

Qubitul x este qubitul de control în funcție de a cărui valoare vom nega sau nu y . O simplă analiză a cazurilor posibile ne face să observăm că putem descrie valoarea lui y după aplicarea unei porți C-Not prin funcția logica x XOR y .

În informatica cuantică teoretică, se utilizează o reprezentare matricială pentru porțile cuantice, reprezentare care are avantajul de a permite lucrul într-un cadru formal. Prezentăm mai jos operatorii corespunzători transformărilor de bază pe un bit:

- transformarea identică:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- negația:

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- deplasarea de fază:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- combinație a negației și deplasării de fază:

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Se poate verifica foarte ușor că aceste matrice sunt unitare, multiplicându-le cu operatorii adjuncți corespunzători.

Pentru cazul unui C-NOT pe doi biți în care primul bit este bitul de control, matricea corespunzătoare este:

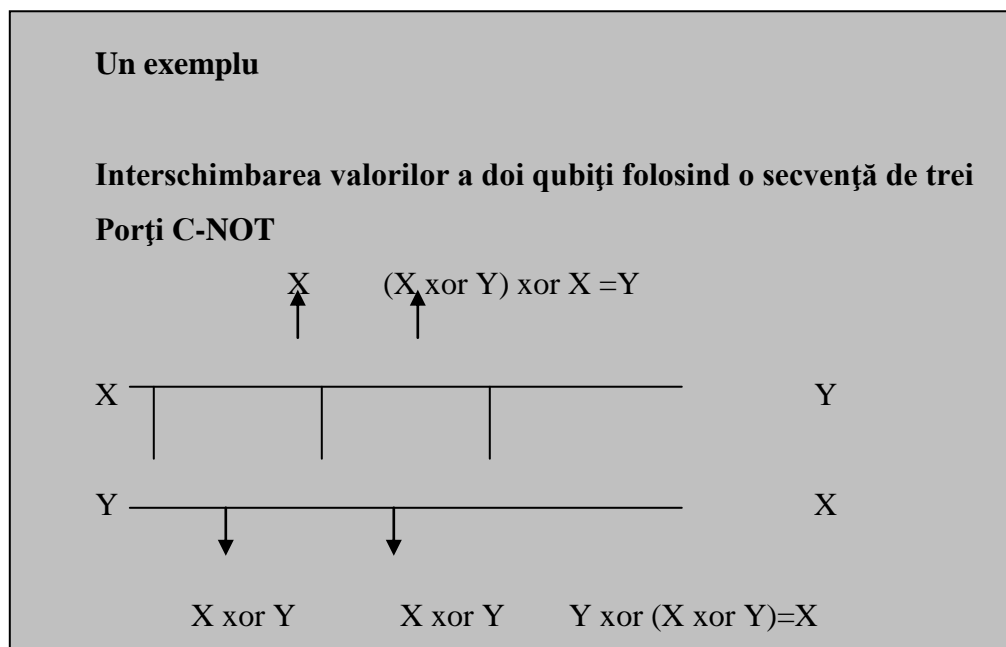
$$C\text{-NOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Operatorul este în mod evident unitar, de vreme ce $C\text{-NOT}^* = C\text{-NOT}$ și $C\text{-NOT} C\text{-NOT} = I$, proprietăți verificabile printr-un simplu calcul. Un aspect important privind acest operator este că el nu poate fi obținut printr-o compunere de porți pe un bit.

Teorema fundamentală, care demonstrează viabilitatea acestei abordări prin prisma porților cuantice, afirmă că orice poartă cuantică se poate obține plecând de la un set elementar de porți pe un bit și poarta C-NOT pe doi biți.

5. Modalități de implementare

Noțiunea de qubit, așa cum am prezentat-o, este mai degrabă un model. Punerea în practică a acestui model este adevărata problemă a fizicienilor. În general, pentru un sistem cuantic se pot distinge mai multe observabile (proprietăți) care, în majoritatea cazurilor, sunt reprezentabile în spații infinite dimensionale. Pentru a modela noțiunea de qubit, informatica cuantică utilizează doar observabile care evoluează într-un spațiu bidimensional. Această abordare păstrează o analogie foarte puternică cu informatica clasică. O abordare în care, spre exemplu, nu am mai utiliza reprezentarea binară a numerelor - ci o reprezentare directă în dimensiunile unui spațiu cu dimensiune infinită, ar fi mult mai radicală și ar schimba însăși paradigmele fundamentale ale informaticii.



O modalitate de a implementa qubit-ul este cu ajutorul capcanelor ionice ("ion traps"). Starea cuantică a unui ion este reprezentată de o combinație liniară a stării de bază (ground) - interpretată ca $|0\rangle$ - și a unei stări excitate - interpretate ca $|1\rangle$. O astfel de stare poate fi menținută pentru o durată de timp comparabilă cu durata de viață a stării excitate. A supra qubiților realizați cu ajutorul acestei tehnologii putem acționa prin intermediul unor pulsuri laser. Dacă focalizăm o rază laser cu o anumită frecvență asupra unui ion aflat în starea $|0\rangle$ (ground), acesta va absorbi pulsul, va trece într-o stare excitată - dar instabilă, de unde va reveni în starea $|0\rangle$ emițând un foton, fapt care va produce o anumită fluorescență. Ionii aflați în starea $|1\rangle$ nu vor reacționa la pulsurile laser rămânând întunecați. Problema principală în folosirea acestei tehnologii este faptul că este foarte lentă. Fiecare puls trebuie menținut cel puțin o durată invers proporțională cu frecvența sa. În practică această durată este de 10^5 secunde, mult prea lentă în comparație cu timpii obținuți pentru circuitele clasice.

Alte posibilități de realizare a qubit-ului sunt polarizarea fotonilor și rezonanța magnetic nucleară (NMR). Aceasta ultimă metodă pare a fi cea mai promițătoare, în ultimul timp spre ea îndreptându-se atenția majorității fizicienilor care lucrează în domeniu. Primele demonstrații concrete ale fenomenelor prezise teoretic : teleportarea, implementare unei porți C-NOT etc. au fost realizate folosind această metodă. În esență, qubiții sunt stocați în anumiți spini nucleari. La acțiunea unui câmp magnetic spinii iau o direcție paralelă cu liniile de câmp având fie același sens (stare asimilată cu $|1\rangle$), fie sens contrar (stare asimilată cu $|0\rangle$). Principala problemă a acestei metode este decoerența foarte mare pe care o implică și care face deja realizarea unor sisteme cu mai mult de 10 qubiți o adevărată provocare. În momentul de față, realizările efective în informatica cuantică sunt, în principal, sisteme în care se reușește implementarea unor operații elementare cu ajutorul a doi sau trei qubiți. Este încă o distanță mare până la realizarea de sisteme în care să se poată manipula sute de qubiți, dar în contextul unei explozii a interesului pentru informatica cuantică opiniile vis-a-vis de realizarea unor implementări utile în următoarea decadă sunt, în general, optimiste.

Un succes impresionant al aplicațiilor bazate pe spin a fost obținut în structuri metalice și utilizează efecte magnetorezistive pentru îmbunătățirea semnificativă a performanțelor hard disk-urilor de la calculatoare și a memoriilor RAM magnetice (MRAMs). Înțelegerea teoretică a transportului de spin este în mod uzual limitată la regimul de răspuns liniar al metalelor și asigură o bună descriere pentru dispozitivele de înmagazinare a datelor și a memoriilor magnetice, dar nu este suficientă pentru procesarea de semnal și logica digitală.

Multe întrebări de bază cum ar fi dacă aplicațiile bazate pe spin vor fi mai rapide și vor necesita mai puțină energie decât aplicațiile bazate pe transport de sarcină, încep să fie investigate. Care sunt avantajele curenților de spin, vor produce mai puțină disipare termică și totuși vor contribui la

transportul de spin in dispozitive practice ? Sunt inca de rezolvat probleme practice de a alege materialele potrivite pentru aplicatii legate de spin si de a intelege modul de proiectare a dispozitivelor bazate pe spin. Totusi, este incurajator sa fie luate in considerare rezultatele experimentale care indica o viteza foarte mare de comutare datorata gradelor de libertate ale spin-ului si un consum redus de energie in timpul functionarii, de asemenea schemele teoretice pentru porti logice necesita mai putine componente decat in in varianta realizarii acestora cu dispozitive bazate pe transportul de sarcina.

6. Intrerupator spin. Tranzistor spin cu efect de camp

O implementare simpla a unui dispozitiv cu efect de spin este intrerupatorul spin, un element cheie pentru capetele de citire a hard disk-urilor de la calculatoare si a memoriilor RAM magnetice, care este format dintr-un material nemagnetic introdus intre doi electrozi feromagnetici. Trecerea purtatorilor prin intrerupatorul spin este determinata de directia spin-ului (sus sau jos) raportata la polarizarea magnetica a electrozilor dispozitivului. In mod normal, cand magnetizarea celor 2 electrozi este paralela (P), trecerea curentului este permisa, iar cand este antiparalela (AP), trecerea curentului este restrictionata.

Deoarece magnetizarea in feromagnetii persista cand este oprita alimentarea, aceste aplicatii au avantajul ca sunt nevolatile. Diferenta de rezistenta (dintre orientarea paralela si antiparalela) este denumita magnetorezistenta (MR). Un intrerupator spin poate fi implementat ca o jonctiune magnetica tunel (MJT), in care regiunea nemagnetica este o bariera tunel. Magnetorezistenta normalizata data de efectul tunel (TMR) este definita ca $(R_{AP}-R_P)/R_P$ si poate fi exprimata astfel:

$$TMR = 2P_L P_R / (1 - P_L P_R)$$

unde $P_{L,R}$ sunt densitatile polarizarilor de spin in cele doua materiale feromagnetice. Similar unui raport semnal/zgomot este de dorit sa avem un TMR cat mai mare, ceea ce este echivalent cu a gasi materiale cu o polarizare de spin ridicata. In timp ce majoritatea eforturilor anterioare au fost axate pe gasirea unor materiale cu polarizare de spin ridicata, o noua strategie, care accentueaza importanta interfetei, s-a dovedit a fi mai eficienta. O crestere spectaculoasa a TMR a fost obtinuta folosind electrozi feromagnetici obisnuiti (CoFe) si inlocuind materialul barierei tunel din Al_2O_3 cu MgO.

In timp ce este util in domeniul memoriilor magnetice, intrerupatorul spin are utilizari limitate in logica digitala. Un model de dispozitiv logic semiconductor, bazat pe spin, numit spin FET (Field Effect Transistor) este descris in Fig. 1. Desi au fost depuse intense eforturi experimentale, raman importante provocari pentru realizarea sa si nu este inca clar daca va avea vreodata utilitate practica. Totusi spin FET are o importanta valoare conceptuala – el ilustreaza o schema generica pentru un

dispozitiv logic bazat pe spin impreuna cu provocarile pentru a realiza elementele sale de baza, cum ar fi injectia de spin si detectia, transportul de spin. Unul din aceste elemente – injectie de spin eficienta la temperatura camerei – a fost recent demonstrata folosind aceeaasi abordare ca la imbunatatirea TMR. Un injector tunel din CoFe/MgO a permis injectia de spin in GaAs si prin urmare a produs o modificare a abordarii dispozitivelor de spin cu semiconductori. Intrebarile anterioare despre fezabilitatea unei injectii eficiente de spin sunt inlocuite treptat cu intrebari despre cum injectia de spin poate duce la imbunatatirea dispozitivelor existente.

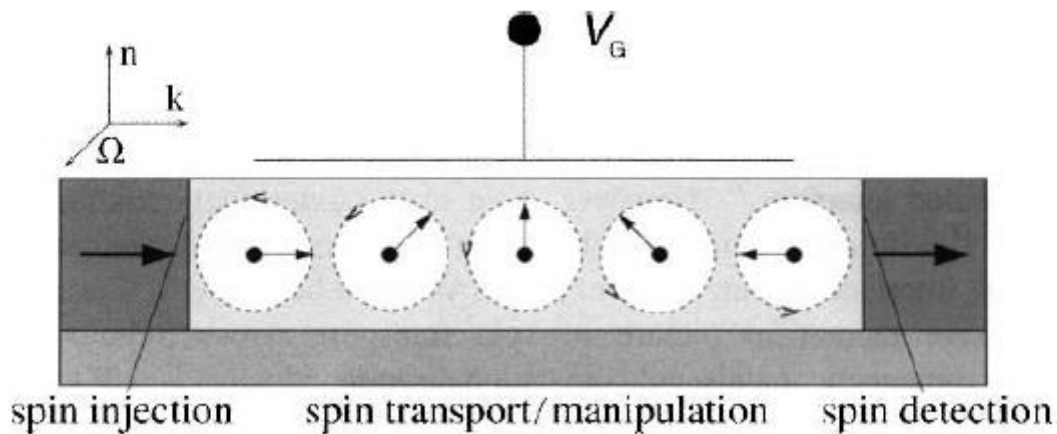


Fig. 1. Spin field effect transistor. Sursa si drena sunt feromagnetice iar canalul formeaza o interfata heterojonctiune. Poarta modifica campul Ω , care este perpendicular pe directia de crestere n si pe momentul electronilor k . Electronii fie intra in drena, fie se intorc la sursa, in functie de directia de spin paralela sau antiparalela cu polarizarea drenei, rezultand starile de ON si OFF.

In contrast cu eforturile de realizare a unui spin FET bazat pe semiconductori, o functionalitate similara a fost realizata recent utilizand o abordare diferita. Un nanotub de carbon (CNT) a fost utilizat ca material nemagnetic aseazat intre o sursa si o drena din materiale feromagnetice. Marimea si sensul TMR intr-un astfel de intrerupator spin cu CNT pot fi controlate prin tensiunea aplicata pe poarta, care schimba conditiile pentru starile ON si OFF.

7. Tranzistor – spin

Viitoarele dispozitive logice pe baza de spin trebuie sa fie capabile sa amplifice semnale si nu doar sa se limiteze la efecte magnetorezistive ca la intrerupatorul spin. Provocarile esentiale pentru spin tranzistoare vor fi sa furnizeze viteza imbunatatita si consum de putere redus prin comparatie cu dispozitivele electronice conventionale, de asemenea sa aiba o functionalitate extinsa prin utilizarea controlului de spin si magnetismului. Fezabilitatea acestor obiective depinde de rezolvarea problemelor

legate de materialele folosite, dar si de intelegerea cum transportul de spin si cuplarea spin/sarcina pot duce la noi concepte de dispozitive.

Cateva proiecte existente de tranzistor spin sunt cunoscute ca tranzistor intrerupator spin si tranzistor cu tunel magnetic. Acestea au o regiune semiconductoare (intre bariere Schottky ori bariere Tunel) si sunt folosite pentru memorii magnetice si senzori mai degraba decat pentru dispozitive logice spin. Termenul tranzistor caracterizeaza mai degraba structura lor cu 3 terminale decat capacitatea de a produce amplificare sau castig de curent.

Controlul prin spin al castigului de curent poate fi ilustrat cu exemplul tranzistorului magnetic cu jonctiune bipolară (MBT) - o generalizare a tranzistorului bipolar conventional. In MBT este cel putin o regiune magnetica – emitor (E), baza (B), colector (C) cu separare de spin. In regim activ normal (jonctiunea EB direct polarizata si jonctiunea BC polarizata invers) o schimbare din exterior a separarii pe baza de spin, prin intermediul unui camp magnetic sau prin proprietati feromagnetice variabile ar putea actiona ca o schimbare efectiva a nivelurilor energetice si poate modifica curentul de sarcina si castigul de curent. Un prototip de MBT care functioneaza la temperatura joasa a fost fabricat folosind jonctiuni din GaAs/(Ga,Mn)As.

Un alt dispozitiv cu trei terminale care furnizeaza un control magnetic al castigului este spin MOSFET. Sursa si drena, asemanator cu spin FET, este formata din metale feromagnetice, asa cum este aratat in Fig. 2. In mod asemanator cu MBT, polarizarea de spin relativa din cele 2 regiuni modifica castigul β al dispozitivului. Un spin MOSFET combina efectul de intrerupator spin cu posibilitatea de a amplifica semnale, care ar putea fi folosita la porti logice reconfigurabile si memorii nevolatile de mare densitate. Se presupune de asemenea ca spin MOSFET ar trebui sa aiba intarzieri mici si consum mic de curent in starea OFF, dar fezabilitatea acestora trebuie inca sa fie demonstrata. Performante optime necesita materiale feromagnetice puternic polarizate, contacte dintre materiale feromagnetice puternic polarizate si siliciu, lucruri care par sa fie foarte dificil de realizat, desi recent au avut loc cateva progrese incurajatoare.

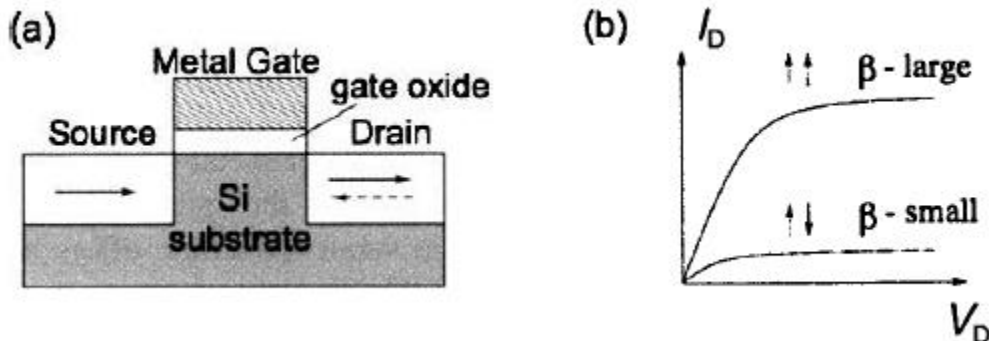


Fig .2. (a) Diagrama schematica spin MOSFET. Schimband orientarea magnetizarii in drena (paralel sau antiparalel fata de cea din sursa) apare o diferenta relativa a castigului de curent descrisa schematic in (b). Cele mai bune performante se obtin cand drena si sursa sunt complet spin polarizate.

8. Materiale utilizate

Doua tipuri de abordari distincte pentru dispozitive logice bazate pe spin, care ar trebui sa opereze la temperatura camerei sunt urmarite in ultimul timp

- (i) Structuri hibride care combina feromagnetii metalici si semiconductori
- (ii) Structuri formate numai din semiconductori

In prima varianta, gama larga de materiale metalice feromagnetice care prezinta o temperatura Curie T_C ridicata furnizeaza o serie de avantaje. In mod normal materialele puternic spin polarizate (de exemplu CrO_2 si Fe_3O_4) ar putea produce atat injectie de spin eficienta in semiconductori cat si puternice efecte magnetorezistive, care sunt importante pentru aplicatiile de memorii nevolatile. Totusi proprietatile intrinseci ale metalelor feromagnetice pot fi puternic modificate la interfata cu semiconductori.

In a doua varianta este de dorit sa avem semiconductori feromagnetici cu o temperatura Curie suficient de mare. Doparea selectiva si confinarea cuantica pot furniza o crestere substantiala a T_C prin comparatie cu semiconductori feromagnetici dopati uniform, astfel in $(Ga,Mn)As$ T_C de circa 170 K poate fi crescut la 250 K prin dopare selectiva. Cu ajutorul acestor tehnici se poate realiza un dispozitiv in intregime semiconductor care permite controlul extern al T_C . Schema unui astfel de dispozitiv este prezentata in Fig. 3.

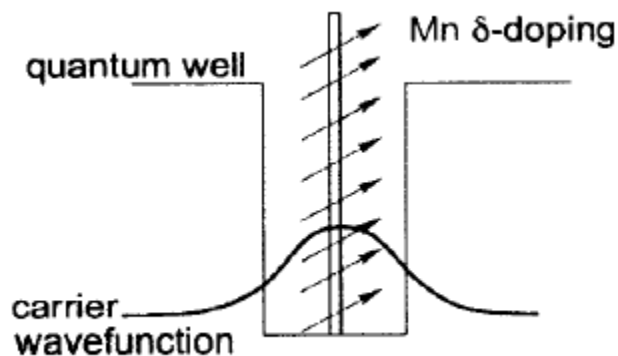


Fig. 3. Controlul extern al T_C in semiconductori feromagnetici. Aplicand polarizare intr-un tunel cuantic $(Ga,Mn)As$ este posibil sa modificam functia de unda a purtatorilor cu spin-ul impuritatilor magnetice. Aceasta schimbare modifica T_C .

Cele mai multe progrese in fabricarea structurilor hibride sau de semiconductori dopati magnetic se bazeaza pe materiale cum ar fi GaAs sau InAs. Acestea permit folosirea de tehnici optice standard pentru injectia si detectia de spin. Lumina polarizata circular poate fi utilizata pentru polarizarea purtatorilor in semiconductori, mai mult chiar, atat directia cat si amplitudinea curentului de sarcina generat optic, cat si curentii de spin pot fi controlati optic. In procesul invers , prezenta purtatorilor polarizati in semiconductori poate fi detectata masurand polarizarea circulara a luminii de recombinare.

9. Concluzii

Desi eforturile de a dezvolta dispozitive logice bazate pe spin sunt abia la inceput, importante elemente au fost deja demonstrate - efecte magnetorezistive, injectie de spin eficienta, detectie de spin, proprietati feromagnetice modificabile prin iluminare sau tensiune de poarta au fost deja realizate in semiconductoare. Succesul obtinut cu aplicatiile pe baza de metale utilizate pentru memorii magnetice si senzori, combinat cu progresul in manipularea activa a gradelor de libertate spin in semiconductori ofera largi posibilitati de exploatare a potentialului dispozitivelor logice bazate pe spin.

Bibliografie

1. I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, "Spintronics: Fundamentals and applications," *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
2. S. Maekawa, ed., *Concepts in Spin Electronics*, Oxford: Oxford University Press, 2006.
3. S. Maekawa and T. Shinjo, eds., *Spin Dependent Transport in Magnetic Nanostructures*, New York: Taylor & Francis, 2002.
4. S. S. P. Parkin, X. Jiang, C. Kaiser, A. Panchula, K. Roche, and M. Samant, "Magnetically engineered spintronic sensors and memory," *Proc. IEEE* **91**, 661 (2003).
5. E. I. Rashba, "Spin currents in thermodynamic equilibrium: The challenge of discerning transport currents," *Phys. Rev. B* **68**, 241315 (2003).
6. Y. Nishikawa, A. Tackeuchi, S. Nakamura, S. Muto, and N. Yokoyama, "All-optical picosecond switching of a quantum well etalon using spin-polarization relaxation," *Appl. Phys. Lett.* **66**, 839 (1995).
7. J. Rudolph, D. Hagele, H. M. Gibbs, G. Khitrova, and M. Oestreich, "Laser threshold reduction in a spintronic device," *Appl. Phys. Lett.* **82**, 4516 (2003).
8. M. Tanaka, "Spintronics: Recent progress and tomorrow's challenge," *J. Crystal Growth* **278**, 25 (2005).
9. S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. Rice, M. Samant, and S.-H. Yang, "Giant room temperature tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with MgO(100) tunnel barriers," *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).
10. S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions," *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
11. S. Datta and B. Das, "Electronic analog of the electro-optic modulator," *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990).
12. Yu. A. Bychkov and E. I. Rashba, "Properties of a 2D electron-gas with lifted spectral degeneracy," *JETP Lett.* **39**, 78 (1984).