Dispozitive micro-electro-mecanice

Mihai Budiu — mailto:mihaib+@cs.cmu.edu
http://www.cs.cmu.edu/~mihaib/

decembrie 2000

Subiect: parametrii discurilor magnetice construite pe baza dispozitivelor micro-electro-mecanice

Cunoştinţe necesare: funcţionarea unui hard-disc

Cuvinte cheie: MEMS, disc

Cuprins

1 Evoluţie şi revoluţie tehnologică **1**

2 Dispozitive micro-electro-mecanice (MEMS) **2**

3 MEMS pentru stocarea de informaţii **3**

4 Parametri **3**

5 Direcţii viitoare de cercetare **6**

6 Concluzii **7**

7 Alte surse de informaţie **7**

1 Evoluţie şi revoluţie tehnologică

Marea majoritate a calculatoarelor fabricate şi vîndute în ziua de azi, indiferent de mărime şi cost, folosesc cam aceleaşi tehnologii fundamentale: memorii DRAM, microprocesoare, hard-disc-uri, reţele de interconectare (de exemplu, bus-ul între procesor şi memorii şi reţelele locale). Am lăsat deoparte dispozitivele de intrare-ieşire care sunt ceva mai variate, dar care sunt neesenţiale pentru funcţia de calcul a maşinii. Orice cercetător în domeniile ne-teoretice ale calculatoarelor trebuie să ţină cont de parametri acestor variate dispozitive (de exemplu, un procesor la ora actuală poate funcţiona la o frecvenţă a ceasului intern de pînă 1500 de megahertzi) şi de evoluţia lor în viitorul apropiat (de exemplu, ne aşteptăm ca frecvenţa de ceas să se dubleze la fiecare 18 luni).

Din cînd în cînd însă apar în arenă jucători noi, care nu respectă regulile jocului tradiţional. Aceştia sunt noi tehnologii, care oferă o soluţie radical diferită unei probleme clasice. Despre o astfel de tehnologie va vorbi pe scurt şi articolul de faţă. În general, soarta unei tehnologii revoluţionare este greu de anticipat; o mulţime de factori contribuie la succesul sau insuccesul său. Una dintre cele mai mari bariere pe care o tehnologie nouă trebuie să le doboare este eficienţa deosebită atinsă de tehnologiile tradiţionale.

De exemplu, în acest text voi prezenta o tehnologie care vrea să suplinească discurile dure (hard-disc) folosite în mod curent pentru stocarea informaţiei. Însă aceste dispozitive sunt fabricate în cantităţi astronomice, şi ca atare beneficiază de *economii de scară*: preţul unitar este mult mai redus dacă se produc foarte multe bucăţi. Deoarece tehnologiile noi sunt adoptate lent, la început nu vor beneficia de o economie de scară; pentru a lupta cot-la-cot împotriva celor tradiţionale, nu este suficient să fie la fel de bune: trebuie să fie mult mai bune, să ofere calităţi suplimentare, pentru a fi adoptate încetul cu încetul, înainte de a deveni şi eficace din punct de vedere economic.

De aceea, chiar dacă veţi fi fascinaţi (cum şi eu sunt) de calităţile obiectelor pe care le voi prezenta, asta nu înseamnă că de mîine le veţi putea cumpăra din magazin: ele mai au o luptă foarte lungă de dus pînă la a fi adoptate pe scară largă. La ora actuală ele sunt încă doar în laboratoarele de cercetare; cu toate că se arată foarte promiţătoare, nu e limpede dacă vor izbîndi în războiul economic. Eu cred însă că veţi fi intrigaţi de combinaţia lor de calităţi suficient pentru a nu regreta că aţi citit acest articol.

2 Dispozitive micro-electro-mecanice (MEMS)

Dispozitivele micro-electro-mecanice sunt, aşa cum arată şi numele lor, rodul cercetării interdisciplinare la graniţa a trei domenii diferite: mecanică fină (foarte, foarte fină), electronică şi semiconductori.

Numele lor englezesc este "Micro-electro-mechanical systems", abreviat MEMS. Voi folosi în continuare această prescurtare.

Aceste dispozitive conţin mecanisme de dimensiuni de ordinul micronilor, capabile de mişcări foarte precise. Adesea aceste mecanisme sunt acţionate fie de forţe electro-magnetice, fie de energie chimică, fie luminoasă. Pentru comparaţie, un fir de păr omenesc are o grosime de aproximativ 100 de microni. Dispozitivele MEMS sunt deci de zeci de ori mai mici decît grosimea unui fir de păr!

Un fapt foarte interesant este că tehnologia cea mai folosită pentru a fabrica mecanisme atît de mici este aceeaşi ca cea folosită pentru construirea circuitelor integrate pe bază de siliciu. Asta înseamnă că metodologia este foarte bine înţeleasă, şi că fabricaţia este foarte eficientă. Circuitele integrate (deci şi MEMS) sunt fabricate prin *litografie*, folosind lumina ultravioletă trecută printr-o *mască* cu umbre pentru a grava semne pe o pilulă minusculă de siliciu. Lumina acţionează simultan asupra întregii suprafeţe, putînd crea simultan multe obiecte foarte complicate.

Credeţi ca e vorba de SF? Dimpotrivă, MEMS sunt deja folosite pe scară largă în multe domenii, şi vor deveni din ce în ce mai întîlnite. Iată cîteva exemple:

- Fiecare maşină echipată cu air-bag foloseşte accelerometre pentru a detecta momentul impactului (şocul se traduce printr-o deceleraţie foarte puternică). Aceste accelerometre sunt bazate pe dispozitive MEMS.

- Filmul Star-Wars, episodul I "The Phantom Menace" al lui George Lucas, a inaugurat o nouă epocă în cinematografie prin introducerea cinematografiei digitale. Imaginea este filmată cu camere digitale, care nu folosesc filme procesate chimic, ci citesc imaginea cu dispozitive fotoelectrice şi o stochează pe hard-disc-uri. Proiecţia imaginii se face folosind proiectoare digitale, care reproduc pixelii individuali. Aceste proiectoare, foarte puţine la număr deocamdată, costînd cam o sută de mii de dolari fiecare, conţin milioane de mici oglinzi care reflectă lumina spre ecran. Fiecare oglindă se mişcă de 24 de ori pe secundă (pentru fiecare cadru), fiind acţionată de un dispozitiv MEMS.
- În urmă cu cîteva luni compania Lucent a anunţat primul ruter complet optic pentru reţele de calculatoare[1]. Acest ruter nu mai transformă semnalul optic într-unul electric pentru prelucrare şi înapoi, ci foloseşte oglinzi ghidate de MEMS pentru a comuta direct semnalul optic.
- Există motoare de dimensiunea a zeci microni, roboţi articulaţi, pensete de cîţiva microni şi tot felul de alte dispozitive miraculoase, ale căror aplicaţii de la medicină la cele militare sunt nenumărate.

3 MEMS pentru stocarea de informaţii

În acest articol voi discuta doar despre una dintre posibilele aplicaţii ale dispozitivelor MEMS, dezvoltată în cadrul unui grup de cercetare din Departamentul de Inginerie Electrică şi Calculatoare al Universităţii Carnegie Mellon. Figurile din acest text au fost puse la dispoziţie cu amabilitate de Steve Schlosser, care lucrează la teza sa de doctorat în cadrul acestui colectiv. Voi vorbi despre utilizarea dispozitivelor MEMS pentru stocarea de informaţii persistente, asemenea discurilor.

Figura 1 ilustrează arhitectura sistemului conceput la Carnegie Mellon. Figura 2 arată cum sunt plasate datele pe mediul magnetic.

4 Parametri

Pentru a putea spune dacă dispozitivele MEMS au oarece merite, trebuie să vedem care sunt parametrii lor de funcţionare, şi cum se compară cu cei ai unui disc modern (sau chiar ai unui disc din viitorul apropiat, cînd dispozitivele MEMS vor intra probabil pe piaţă). În tabela 1 am sintetizat unii dintre cei mai importanţi parametri. Valorile lor sunt aproximative: cele pentru MEMS sunt derivate fie din măsurători, fie folosind modele fizice sau electrice ale dispozitivelor (încă nu există un prototip complet fabricat). Parametrii discurilor sunt combinaţi şi extrapolaţi de la felurite discuri performante din ziua de astăzi.

La o prima privire putem spune că dispozitivele MEMS pierd la capacitate şi cost. În schimb cîştigă la dimensiuni, timp de acces, rata de transfer a informaţiei, densitate informaţională şi consum de putere.

Multe din aceste avantaje pot fi uşor explicate dacă studiem diferenţele fizice dintre cele două dispozitive. Un disc magnetic trebuie să se rotească permanent pentru a putea fi citit. Asta implică

[1] Pentru un articol despre rutere şi rolul lor în Internet vedeţi şi textul meu din PC Report din mai 1998, disponibil şi din pagina mea de web.

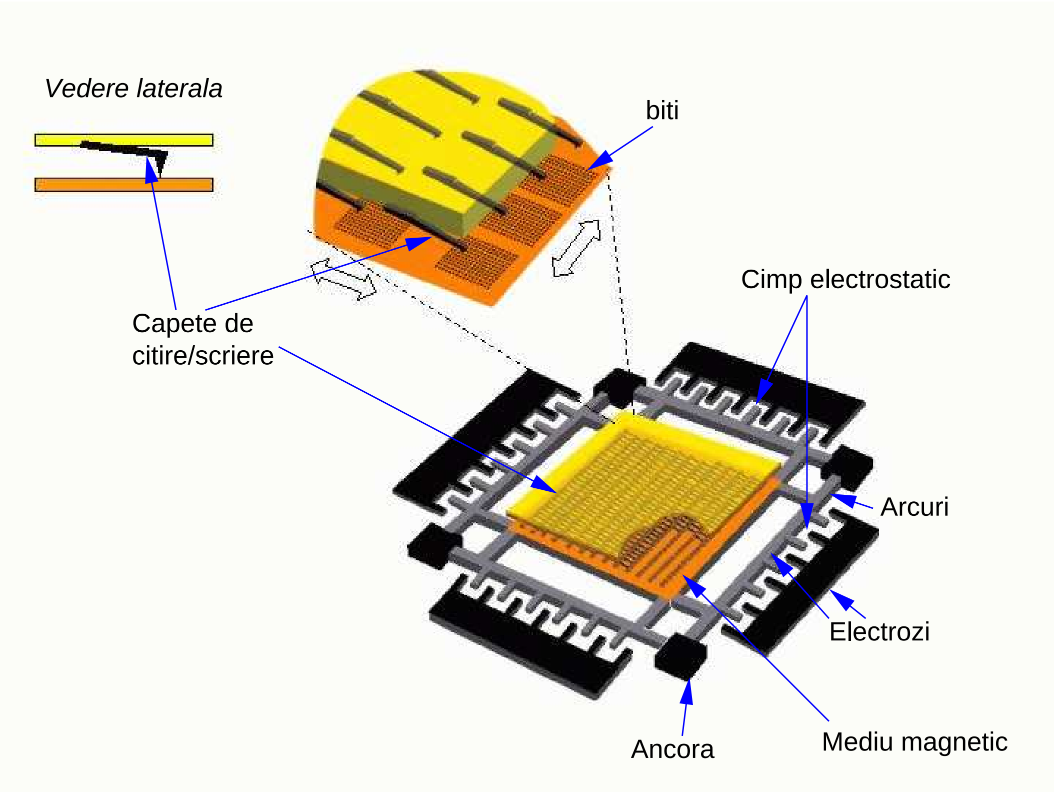

Figura 1: Arhitectura dispozitivelor MEMS pentru stocarea informaţiei. Informaţia este stocată pe un mediu magnetic, asemănător celui folosit pentru hard-disk-urile comerciale. Întregul circuit are cam 1cm^2. Mediul magnetic este mobil, putînd fi deplasat de-a lungul axelor X şi Y cu aproximativ 100 microni. Mişcarea mediului este realizată cu un cîmp electrostatic, format între "pieptenii" de la extremităţi. Controlînd valoarea cîmpului pentru fiecare pieptene se obţine deplasarea dorită pe cele două axe. Arcurile de la colţuri balansează cîmpul electrostatic şi aduc mediul mobil la loc după ce cîmpul este oprit. Deasupra mediului magnetic sunt plasate 6400 de capete de citire-scriere, înfăţişate în partea de sus a figurii. Fiecare cap are mecanisme proprii de control, care reglează distanţa pe verticală dintre cap şi mediul magnetic, corectînd fluctuaţiile datorate variaţiei de temperatură.

un consum constant de energie, chiar şi cînd discul nu este folosit. Discurile din calculatoarele portabile sunt programate ca după un timp de inactivitate să se oprească. Dezavantajul acestei metode este că repornirea consumă mai multă energie şi durează destul de mult timp. Un dispozitiv MEMS în poziţie standby (nefolosit) nu are nimic de făcut; "sania" cu mediul magnetic stă în echilibru.

Timpul de acces extrem de rapid al dispozitivelor MEMS este datorat distanţei foarte mici de parcurs pentru a accesa orice bit: deplasarea maximă este de 100 de microni pe fiecare axă. Prin contrast, un disc trebuie să facă în medie o jumătate de rotaţie şi să deplaseze capetele pe pista dorită.

Viteza de transfer a informaţiei este superioară în dispozitivele MEMS pentru că foarte multe

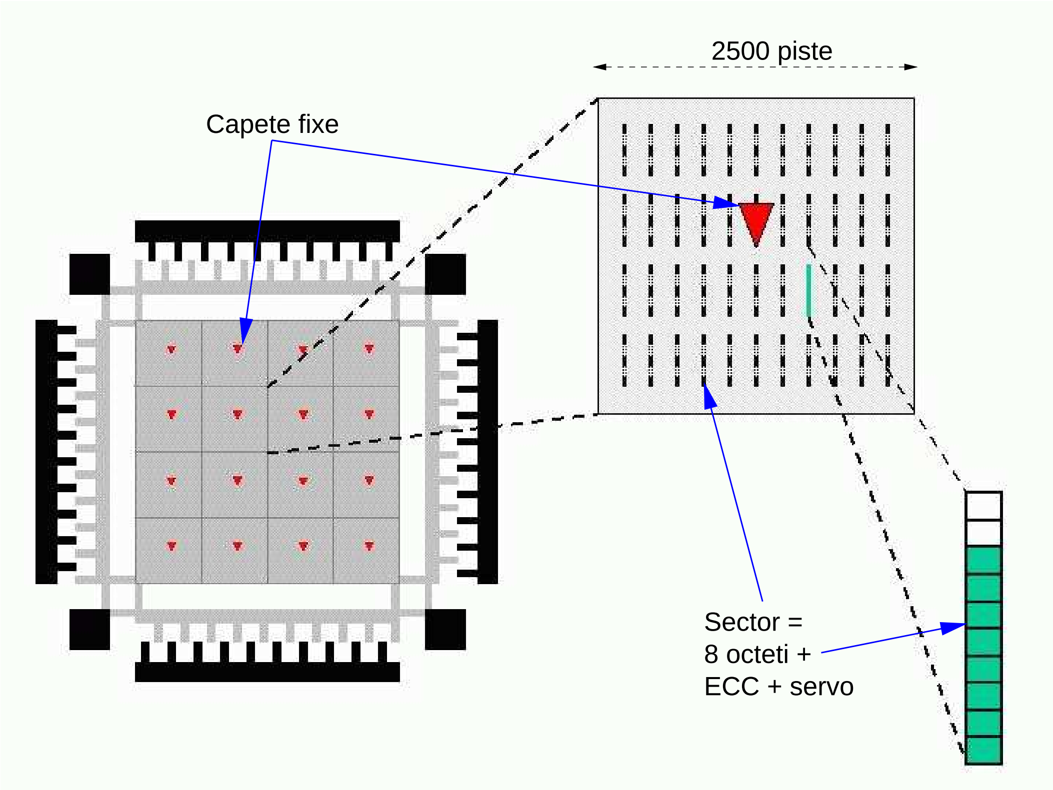

Figura 2: Plasamentul datelor pe dispozitivul MEMS. Din cauza deplasamentului limitat, fiecare cap de citire/scriere accesează o porţiune separată a mediului magnetic. Informaţia este înregistrată în *sectoare* de-a lungul direcţiei verticale din figură. Fiecare sector conţine 8 octeţi de date codificaţi folosind un cod corector de erori (Error Correcting Code, ECC), şi informaţii despre identitatea sectorului. Acestea din urmă sunt folosite de servo-mecanismele ataşate capului pentru a calibra poziţia capului, adaptînd dispozitivul la imperfecţiuni de fabricaţie şi variaţii de dimensiune datorate încălzirii produse de funcţionare.

capete pot citi şi transmite informaţiile *simultan*. Prin comparaţie, un disc magnetic are un număr foarte mic de capete, care arareori sunt folosite simultan.

Din păcate nu toate capetele pot fi active simultan pentru un dispozitiv MEMS, fiindcă consumul de energie este proporţional cu numărul de capete active. Simulări arată că dacă mai mult de circa 1000 de capete sunt active, energia nu se poate disipa suficient de rapid, iar încălzirea produsă pune în pericol integritatea circuitului.

Densitatea sporită de informaţie provine din faptul că biţii pot fi stocaţi de un MEMS în pătrăţele, pe cînd un disc obişnuit foloseşte dreptunghiuri de 16 ori mai lungi decît late. MEMS poate funcţiona cu o arie mai mică din cauză că precizia de poziţionare e mai mare pentru un aparat atît de mic.

Folosind aceşti parametri, a fost construit un model pentru simulatorul DiskSim; acesta poate prezice comportarea unui disk plecînd de la parametrii săi fizici. Pentru a evalua comportarea sistemului au fost folosite sumare ale execuţiei unor programe (*execution traces*) colectate de pe

Dimensiunea	MEMS	disc
Lăţimea unui bit	30x30nm^2	10000nm^2
Volum	1 cm^3	100 cm^3
Acceleraţia saniei cu mediul magnetic	15g	—
Rata de transfer a informaţiei	400Kbps/cap	240Mbps
Viteza de deplasare	12mm/s	10000 rotaţii pe minut
Timp de amortizare a oscilaţiilor după deplasare	0.5ms	—
Viteza maximă de transfer a informaţiei	54M/s	30M/s
Număr de capete active simultan	1000	1
Număr de suprafeţe magnetice	1	8x2
Număr total de capete	6400	16
Capacitatea	5.8G	80G
Timp mediu de acces la informaţie	2ms	7ms
Cost/Gb	10$	1$
Putere consumată	1mW/cap activ	2.5W
Putere consumată în standby	0.05mW	600mW
Timp de tranziţie din activ în standby	1ms	3–8s
Rezistenţă la şoc	excelentă	slabă

Tabelul 1: Comparaţie între parametrii unui dispozitiv de stocare a informaţiei bazat pe MEMS şi un hard-disc modern.

calculatoare reale. Un sumar include toate operaţiile executate de sistemul de operare pentru a accesa un disc. Aceste sumare au fost apoi executate folosind simulatorul cu noul model de disc.

Rezultatele au fost foarte plăcute: din cauza timpului de aşteptare mediu mult redus, aplicaţiile care erau limitate de disc au beneficiat de o creştere substanţială a vitezei de execuţie. Bazele de date şi linker-ul (programul care crează executabilul final după compilarea unui program) au beneficiat cel mai mult.

5 Direcţii viitoare de cercetare

În acest articol am trecut sub tăcere o grămadă de dificultăţi potenţiale. Mai există importante probleme de rezolvat pe toate planurile înainte de a transforma circuitele micro-electro-mecanice în dispozitive fiabile de stocare a informaţiei. De exemplu, nu este de loc limpede care este fiabilitatea unor dispozitive care au atîtea părţi active. Cîte capete pot fi defecte, şi care este durata medie de viaţă? Coduri mai puternice pentru corectarea de erori, şi tehnici folosite în discurile RAID (Redundant Array of Inexpensive Disks) pot fi folosite pentru a compensa unele erori.

Alt subiect ne-explorat constă în a găsi locul ideal într-un sistem de calcul pentru un dispozitiv MEMS; costul acestuia este undeva între disc şi o memorie FLASH, iar funcţionalitatea este asemănătoare acestora. Se pot imagina o mulţime de aplicaţii utile: cache pentru un disc mai mare şi mai lent, memorie stabilă pentru aparate portabile, cum ar fi telefoane celulare, aparate muzicale digitale, etc. Aplicaţiile militare ale unui dispozitiv rezistent la şocuri şi cu capacitate mare de stocare sunt nelimitate.

6 Concluzii

În acest text am aruncat o privire sumară într-un domeniu interdisciplinar foarte "fierbinte", cel al dispozitivelor micro-electro-mecanice. Unele din aplicaţiile acestora au păşit deja din domeniul SF în realitatea imediată. O cercetare febrilă pentru aplicaţiile noii tehnologii se desfăşoară în mai multe domenii; foarte multe universităţi şi companii au centre speciale de cercetare consacrate acestui domeniu.

În acest text am descris pe scurt o serie de studii care analizează arhitectura şi performanţele unui sistem bazat pe MEMS pentru stocarea de informaţii persistente, asemănător unui hard-disc. Rezultatele preliminare arată că performanţa MEMS este superioară discurilor. Cu toate acestea, costul şi fiabilitatea sunt încă necunoscute. Succesul noii tehnologii depinde acum în mare măsură de felul în care inginerii, fabricanţii şi comercianţii vor răspunde întrebărilor rămase.

7 Alte surse de informaţie

O pagină de web cu multe informaţii despre MEMS şi cu şi mai multe legături pe web este la `http://mems.isi.edu`.

Cercetarea în domeniul micro-electro-mecanic din Departamentul de Inginerie Electrică şi Calculatoare al Universităţii Carnegie Mellon are o pagină la `http://www.ece.cmu.edu/~mems`. Acest laborator este preocupat mai ales de nivele "joase": fabricaţie, materiale, proprietăţi fizice, electrice şi mecanice, etc.

La `http://www.lcs.ece.cmu.edu/research/MEMS/index.html` este pagina proiectului CMU care studiază stocarea de informaţii pe MEMS.

În luna mai a anului 2000 prestigioasa revista Scientific American a consacrat un număr special viitorului dispozitivelor de stocare. Din fericire, articolul de fond este disponibil electronic la `http://www.sciam.com/2000/0500issue/0500toig.html`; textul conţine şi o secţiune despre dispozitive MEMS.

Proiectul industrial cel mai avansat pentru stocarea de date pe MEMS este proiectul Millipede ("miriapod"), al companiei IBM Una dintre publicaţiile foarte ample ale acestui proiect este disponibilă la `http://www.research.ibm.com/journal/rd/443/vettiger.html`. Multe idei sunt asemănătoare cu cele ale proiectului CMU, dar există diferenţe substanţiale în privinţa materialelor şi metodei folosite pentru stocare.

Simulatorul de disc DiskSim este disponibil de la `http://www.ece.cmu.edu/~ganger/disksim/`.