

Meer, meer, meer

Leon Abelmann

20 april 2001

Inhoudsopgave

1 Probe recording	1
1.1 Probe array	2
1.2 Micromechanische positionering . . .	4
2 Conclusie	6

In de vorige aflevering hebben we laten zien hoe de harde schijf ten gronde dreigt te gaan aan zijn eigen succes. De enorme snelheid waarmee de capaciteit wordt verhoogd, gaat niet gepaard met een gelijke verbetering van de performance: de lees-snelheid en de toegangstijd. Als er niks gebeurt, gaat over een paar jaar de harde schijf de prestaties van het totale computer-systeem bepalen, dit tot afschuw van processor fabrikanten zoals Intel en AMD. Een oplossing voor dit probleem kan worden gevonden in een combinatie van twee recente wetenschappelijke ontwikkelingen: probe microscopie en micromechanische positionering.

1 Probe recording

De hard-disk heeft op zijn minsts twee fundamentele problemen, In de eerste plaats is het aantal lees/schrijfkoppen klein, voor een goedkope schijf is het er maar één, voor wat duurdere hooguit 10, en dat aantal is niet toegenomen in afgelopen tientallen jaren. In zo'n geval zeggen we dat het systeem *slecht schaal*: dezelfde hoeveelheid koppen moet steeds meer data steeds sneller ophalen. Beter zou het zijn als de verhouding tussen het aantal koppen en de capaciteit constant zou zijn: twee keer zoveel data betekent twee keer zo veel koppen, maar dat loopt natuurlijk vast in het huidige ontwerp van de harde schijf. Het tweede probleem is dat de harde schijf met een constante snelheid moet ronddraaien. Daardoor is de snelheid van de kop tijdens lezen of schrijven hetzelfde als tijdens het

zoeken. De maximale snelheid wordt bepaald door de snelheid waarmee de kop kan lezen of schrijven, en dat beperkt dus de snelheid waarmee je de data kunt zoeken: de toegangstijd. Veel beter zou het zijn als de lees/schrijf-snelheid en de toegangstijd ontkoppeld waren.

In een nieuwe architectuur voor massa data opslag zul je daarom twee dingen moeten verbeteren: In de eerste plaats moet je naar een parallel systeem met veel meer lees/schrijf koppen, en dat systeem moet netjes schalen: meer capaciteit betekent meer koppen. In de tweede plaats heb je een positionerings-systeem nodig dat heel eenvoudig van snelheid kan veranderen. In dat geval wordt het pas weer mogelijk het grote gat dat is ontstaan tussen de gigantisch toegenomen capaciteit aan de ene kant, en de slechts geringe afname in toegangstijd aan de andere kant weer te dichten.

Met het oog op de toekomst zal dat nieuw systeem de mogelijkheid moeten bieden tot ultra-hoge data-dichtheid, mogelijk zelfs niet-magnetisch. Met de huidige groei van 100% per jaar bereiken we namelijk over 10 jaar een punt waarbij de bits de afmetingen van een enkel molecuul krijgen, en over 20 jaar het punt waar we één bit per atoom gaan opslaan (Tabel 1 ¹).

De combinatie van parallelle lees/schrijf koppen, variable positioneringssnelheden en ultra-hoge dichtheid vind je in de zogenaamde *probe recording systemen*. Deze zijn gebaseerd op een Nobelprijs winnende uitvinding van twee IBM onderzoekers: de Scanning Tunneling Microscop (STM) die het voor het eerst mogelijk maakte individuele atomen af te beelden [7]. Al vrij snel na de uitvinding van de STM werd door dezelfde onderzoekers de Atomic Force Microscope uitgevonden. In dit type microscoop wordt met een heel scherp

¹1 Terabit=1000 Gbit=10⁹ bit, 1 Petabit=1000 Tbit=10¹⁵ bits

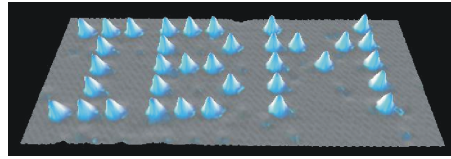
Jaar	Data-dichtheid (bit/cm ²)	bit afmetingen (nm)
2000	6.2 Giga	127.0
2002	25 Giga	63.5
2004	99 Giga	31.8
2006	397 Giga	15.9
2008	1.6 Tera	7.9
2010	6.3 Tera	4.0
2012	25 Tera	2.0
2014	101 Tera	1.0
2016	406 Tera	0.5
2018	1.6 Peta	0.2
2020	6.5 Peta	0.1

Tabel 1: Prognose van data-dichtheid en bijbehorende bit-afmetingen, uitgaande van 100% groei in dichtheid per jaar. Op het ogenblik groeit de capaciteit van harde schijven met 130% per jaar...

naaldje dat op een piepklein veertje zit, het oppervlak van een object afgetast en een hoogte-plaatje gemaakt, eigenlijk net zoals dat in een platenspeler gaat. Een andere uitbreiding is het naaldje van een magnetisch materiaal te maken en het niet op het oppervlak, maar vlak daarboven te bewegen. Als je zo'n magnetische *probe* (naaldje plus veertje) boven een harde schijf heen en weer beweegt, dan kan je magnetische krachten zichtbaar maken, en dus een plaatje maken van geschreven bits. Dit noemen we Magnetic Force Microscopie (MFM), een instrument waar we in ons onderzoek uitgebreid gebruik van maken, en waar we later op terug komen.

1.1 Probe array

Al deze probe microscopie technieken zijn in principe ook bruikbaar om het oppervlak te bewerken. Met een STM is het bijvoorbeeld mogelijk individuele atomen te verplaatsen (figuur 1). Dat opent de mogelijkheid om data op te slaan in de positie van atomen: één bit per atoom, dat is pas een flinke datadichtheid! En het wordt saai, ook dit is demonstreerd door IBM. Alleen is het bij deze probe microscopie technieken niet ongebruikelijk dat je een half uur op een plaatje moet wachten, het scherpe naaldje moet namelijk erg langzaam worden bewogen om de ruis uit te middelen. Als we heel erg ons best doen halen we misschien 1 MegaBit per seconde: veel te langzaam voor re-

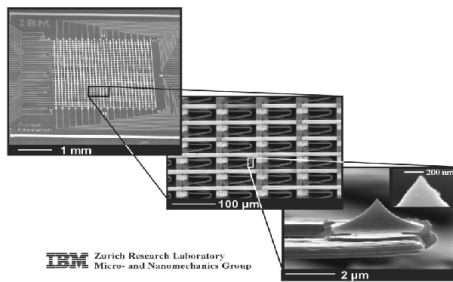


Figuur 1: Data-opslag in individuele atomen

alistische systemen als we maar een probe zouden gebruiken. Maar we willen toch naar een systeem met parallelle lees/schrijf koppen, en er is dan helemaal geen probleem. Integendeel, de veertjes in probe microscopen zijn maar 0.1 mm groot, en dus er passen er tienduizend op een vierkante centimeter, in zogenaamde *probe arrays*. Met dergelijke arrays schieten de datarates ineens naar een heel aardige 10 GigaBit per seconde, 10 keer sneller dan de snelste harde schijf!

IBM is op het ogenblik het verst met de ontwikkeling van dergelijk *probe arrays* [1]. Om het systeem te demonsteren, hebben ze voor een heel simpele manier van data-opslag gekozen. In hun *Millipede* (duizendpoot) (figuur 2) worden kleine gaatjes in een heel dunne kunstof laag gesmolten met een probe die kan worden verhit door middel van een stroom - zoiets als een piepkleine soldeerbout. Bij het uitlezen van de data wordt van dezelfde probes gebruik gemaakt, de stroom door het verhittings-element is dan alleen veel kleiner, zodat ze geen gaatjes meer kunnen smelten. Als het naaldje van de probe zich in een gaatje bevindt, wordt hij goed gekoeld door het materiaal dat zich onder de kunststof laag bevindt. Als de naald dus naast een gaatje staat is zijn temperatuur dus iets hoger dan als hij zich in een gaatje bevindt. Dat verschil in temperatuur vertaalt zich in een verschil in elektrische weerstand, die eenvoudig te meten is via de spanning over de probe.

Dat het principe werkt, is aangetoond met een array van 1000 probes dat een afmeting heeft van 3×3 mm [4]. Daarmee zijn gaatjes in de kunstof laag geschreven met een afstand van minder dan 100 nm van elkaar. Op dat oppervlak van 3×3 mm kan je dus meer dan een GigaBit aan informatie kwijt. De IBM onderzoeksgroep, die is gehuisvest in Zwitserland, is van plan om de capaciteit met minstens nog een factor 10-100 te verhogen zodat ze op dat kleine oppervlak enkele GigaBytes aan

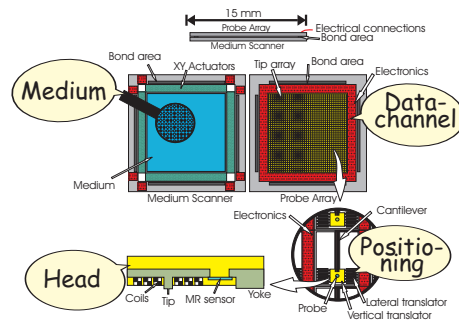


Figuur 2: Het IBM Milled probe array

informatie kunnen opslaan.

Alhoewel het een heel elegante en simpele oplossing is, kleven er aan het kunststof laagje dat in de Millipede van IBM wordt gebruikt een paar nadelen. Als er eenmaal een gaatje in de dunne laag zit, krijg je dat niet zo maar weer dicht. Je kunt dus maar één keer schrijven: *WORM* (write-once, read-many). Het is wel mogelijk alle data te wissen door de gehele laag op te warmen tot boven de 150 °C. Voor sommige toepassing kan dat handig zijn, bijvoorbeeld in een digitale foto-camera. Een ander probleem met de kunststof laag is dat we eigenlijk helemaal niet goed weten hoe de geschreven bits zich gedragen: Wat is hun stabiliteit? Kunnen gaatjes spontaan of door vaak lezen dichtlopen of samenvloeien tot een groter gat? Kan je data meer dan 10 jaar bewaren? Hoe klein kan je de gaatjes maken? Met dit soort onzekerheden zal het moeilijk zijn de gevestigde dataopslag industrie ervan te overtuigen deze nieuwe *probe recording systemen* tot een product te ontwikkelen. Daarom werken we samen met onderzoekers van de Carnegie Mellon University in Pittsburgh, USA, aan een systeem dat met *magnetische* dunne lagen werkt zoals die ook in toekomstige harde schijven gebruikt zullen worden. Die zijn zo vaak te herschrijven als je maar wilt, en bit-voor-bit, en bovendien maken we dan gebruik van al die kennis die in de afgelopen tientallen jaren op het gebied van magnetische dataopslag is opgebouwd.

De Twentse versie van het systeem is het micro Scanning Probe Array Memory (μ SPAM) gedoopt[2] (figuur 3). Voor deze μ SPAM worden twee lees/schrijf principes onderzocht. Het simpelste systeem werkt volgens de Magnetic Force Microscopy techniek die we al eerder hebben ge-

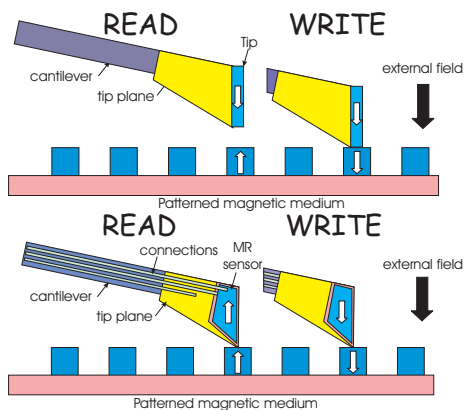


Figuur 3: De opbouw van een μ SPAM systeem

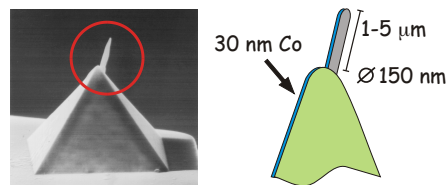
noemd. De data wordt gelezen door detectie van de aantrekking of afstoting van een heel klein staafmagneetje (Figuur 4). Schrijven kan door het staafmagneetje bovenop de magnetische dunne film te drukken, en tegelijkertijd een extern magneetveld aan te bieden. Dat externe veld is te klein alle data te wissen, maar de combinatie van het magnetische staafmagneetje en het externe veld is voldoende om een klein gebiedje om te polen en zo data te schrijven. Het staafmagneetje kan worden omgepoold door een klein electromagneetje op, of vlak achter, de magnetische probe, zodat afwisselend een '1' of '0' kan worden geschreven.

Onze Amerikaanse collega's noemen deze techniek ook wel gekschierend de "typewriter mode", omdat het staafmagneetje iedere keer tegen de magnetische dunne film wordt gedrukt om een bit te schrijven. Een nadeel van deze techniek is dat de lees en schrijfsnelheid afhangen van de resonantie-frequentie van het veertje. Snelheden boven 1 MegaBit per seconde zijn dan heel moeilijk te bereiken, omdat het moeilijk is veertjes te maken die bij die hoge resonantie-frequenties nog voldoende slap zijn om de heel kleine krachten te kunnen meten. Beter zou het zijn als de probe in contact was met het oppervlak, maar dan kan je geen magnetische krachten meer meten.

Lezen en schrijven terwijl de probe in constant contact is met de magnetische dunne laag kan bijvoorbeeld wel worden bereikt door een soortgelijke lees/schrijfkop als in een tape-recorder te gebruiken. Het veld om te schrijven wordt door een minuscule spoeltje gegenereerd, en voor het uitlezen wordt een weerstandselement gebruikt dat



Figuur 4: Lees en schrijf mechanismes voor magnetische probe recording



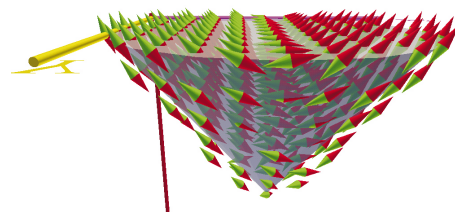
Figuur 5: Een uiterst kleine staafmagneet op een veertje kan worden gebruikt voor het lezen en schrijven van data

gevoelig is magneetvelden (magneto-weerstand sensor of MR-sensor). Die relatief grote MR-sensor bevindt zich in het veertje, en het magnetische veld van de bits wordt via het naaldje van de probe naar die sensor geleid. Het magnetische gedrag van zo'n naaldje is van groot belang voor de werking van de leeskop. Omdat er zulke hoge data-dichtheden worden gebruikt, zijn de magnetische naaldjes erg klein en geleiden ze de magnetische flux niet meer zo goed als je ze verkeert maakt. Bij het ontwerpen maken we daarom gebruik van magnetische ontwerpprogrammas die door ons voor dit doel speciaal zijn ontwikkeld (Figuur 6).

We zijn in de gelukkige omstandigheid dat er op het gebied van tape recording een grote expertise in Nederland aanwezig is. OnStream BV uit Eindhoven is bijvoorbeeld een fabrikant van tape backupsystemen met een van de hoogste data-dichtheden ter wereld[6]. En binnen onze eigen Systems and Materials for Information storage group wordt aan een magneetveld-sensor gewerkt met een record gevoeligheid[3].

1.2 Micromechanische positionering

Een van de voorwaarden voor verbetering van de harde-schijf hebben we dus al te pakken met het *probe array*. De tweede voorwaarde was het ontkoppelen van de lees/schrijfsnelheid en de toegangstijd. Het positionerings-systeem van probe microscopen, de *scanner*, is precies wat we daarvoor nodig hebben. Probe microscopie plaatjes



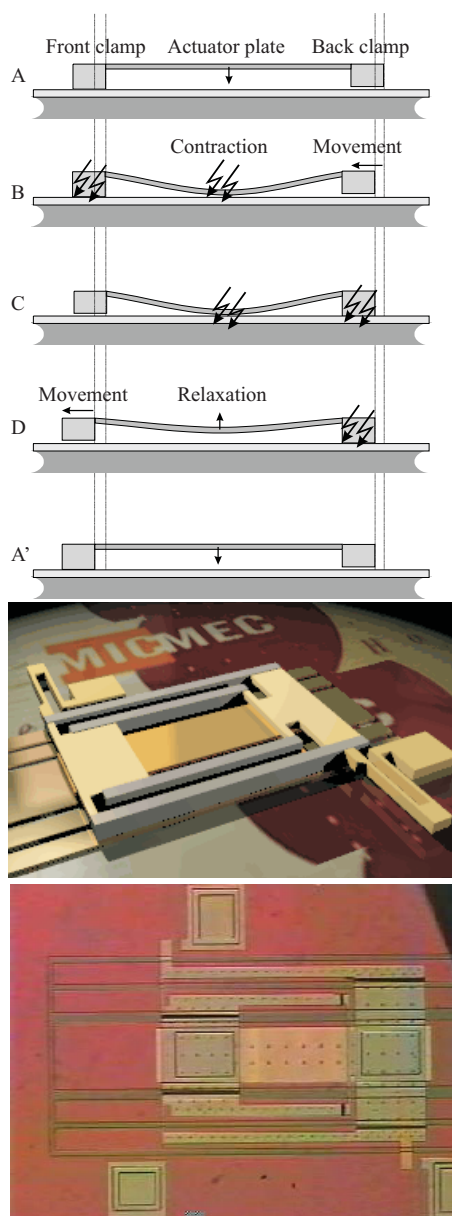
Cone of 255 x 180 nm
with $\lambda = 122$ nm

Figuur 6: Micromagnetische simulaties worden gebruikt om het gedrag van zeer kleine magnetische probes te analyseren

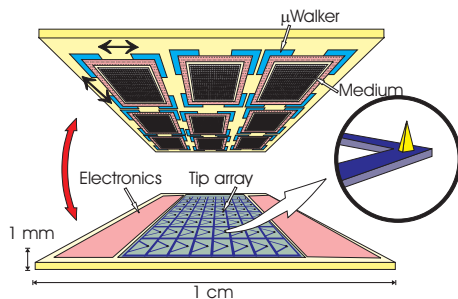
worden in een raster opgebouwd zoals in een televisie of computer monitor. De probe wordt over het oppervlak getransleerd, en niet gerooteerd zoals in de harde schijf. Je kan dan dus heel snel ergens naartoe bewegen via de kortste weg, en daarna langzaam je data lezen en schrijven. Omdat de afstand tussen de probe in het *probe array* maar 0.1 mm is, hoeft de *scanner* ook maar 0.1 mm in twee richtingen te kunnen bewegen om het hele oppervlak van de magnetische dunne film te kunnen beschrijven. Als je dat vergelijkt met de 30 cm die een harde schrijf kop per omwenteling aflegt, begrijp je dat de toegangstijden van probe recording systemen veel lager kunnen zijn dan van harde schijven. Daarbij komt nog dat een harde schijf die bijna leeg is nauwelijks sneller is dan een volle, je moet namelijk altijd wachten totdat de schijf is rondgedraaid tot het punt waar de data staat. In een probe recording systeem is de gemiddelde toegangstijd sterk afhankelijk van de hoeveelheid data die al is geschreven. In een leeg probe recording systeem hoeven de probes ook maar kleine afstanden af te leggen. Een lege μ SPAM zal veel sneller zijn dan een volle: een sterk argument om een grotere aan te schaffen.

Normaal gesproken wordt in een probe microscoop niet op een centimeter gekeken. De meeste microscopen zijn ongeveer zo groot als een frituurpan, en de scanner neemt daarin slechts een paar kubieke centimeter in beslag. In probe recording systemen ligt dat anders. Een probe array is hooguit een centimeter in doorsnee, en minder dan een millimeter dik. Een scanner van een paar centimeter is dan zonde van de ruimte. Het liefste wil je dat de scanner van de zelfde afmetingen is als het probe array, zodat het geheel bijvoorbeeld in een GSM telefoon past. Dat zou nog eens mooi zijn, een 10 GigaByte geheugen in je telefoon: kan je het hele telefoonboek gewoon meenemen of al je muziek in MP3 formaat.

Wat dit betreft kunnen we profiteren van de geweldige ontwikkeling die het micro-mechanische vakgebied de afgelopen tijd heeft doorgemaakt. Binnen het MESA⁺ instituut wordt bijvoorbeeld gewerkt aan positionerings-systemen die maar een tiende millimeter groot zijn (figuur 7). Een sprekend voorbeeld is de μ Walker [5]. Dit systeem kruipt met twee voetjes over het oppervlak als een rups over een blad, en is met zijn snelheid van meer dan 1 mm per seconde uitstekend geschikt voor toepassing in



Figuur 7: Positionering in de μ SPAM wordt gedaan door micromechanische robots die door het MESA⁺ instituut zijn ontwikkeld (boven principe, midden artist impression, onder foto)

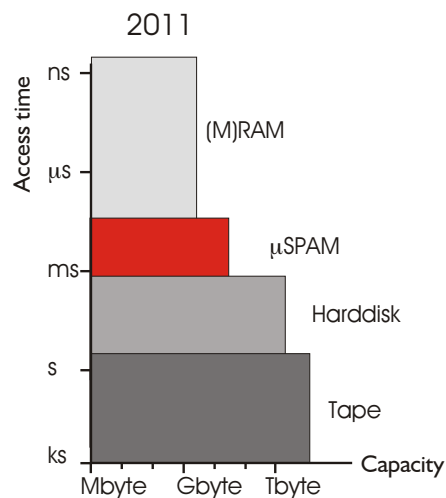


Figuur 8: Veel kleine μ Walker s kunnen worden gebruikt in μ SPAM

de μ SPAM. Omdat de μ Walker zo klein is, kunnen we er enkele tientallen van plaatsen onder een probe array (figuur 8). Dan hebben we naast een groot parallelisme in lees/schrijf koppen ook een groot parallelisme in positionering bereikt. Dat kan grote voordelen hebben voor de totale prestaties van het recording systeem, bijvoorbeeld wat betreft de toegangstijd.

2 Conclusie

Natuurlijk zijn er heel veel haken en ogen die de ontwikkeling van probe recording systemen in de weg staan. Alleen al de integratie van electronica met de micro-mechanische componenten is een flink obstakel. Het is daarom ook niet waarschijnlijk dat de 'gewone' harde schijf binnenkort verdwijnt. Toch kunnen we binnen een paar jaar wel al Millipede-achtige chips (*nanodrives* in IBM terminologie) in kleine apparatuur zoals telefoons, zakcomputers en zelfs horloges verwachten. Daarvoor is de harde schijf simpelweg te grof, ondanks verwoede pogingen van IBM om hem te minaturiseren. Een logische vervolgstap zou zijn dat probe recording systemen in computersystemen worden ondergebracht om het grote verschil in toegangstijd van de RAM en de harde schijf te overbruggen, als een extra bouwsteen in de data-opslag pyramide (figuur 9). Als uiteindelijk data-opslag in moleculen of atomen nodig wordt, dan heeft het probe recording systeem de beste kans, en komt er na ruim een halve eeuw eindelijk een eind aan de succesvolle carrière van de harde schijf.



Figuur 9: De μ SPAM kan het gat opvullen tussen de RAM en de harde schijf in een computer

Referenties

- [1] IBM. Afm. Url, IBM, <http://www.research.ibm.com/topics/popups/serious/nano/html/afm.html>, 2000. 1.1
- [2] ISTG. Micro scanning probe array memory. Url, ISTG, <http://www.el.utwente.nl/tdm/istg/uSPAM>, 2000. 1.1
- [3] ISTG. The spinvalve transistor. Url, ISTG, <http://www.el.utwente.nl/tdm/istg/research/spinvalv/spinvalv.htm>, 2000. 1.1
- [4] M. I. Lutwyche, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürigand W. Häberle, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. K. Binnig, and P. Vettiger. Highly parallel data storage system based on scanning probe arrays. *Applied Physics Letters*, 77(20):3299–3301, 2000. 1.1
- [5] MicMec. /muwalker. Url, MicMec, <http://utep.el.utwente.nl/tt/projects/uwalker/index.html>, 2000. 1.2
- [6] OnStream. Onstream, inc. - recording the digital age. Url, OnStream, <http://www.onstream.com>, 2000. 1.1

- [7] Inventure Place. Heinrich rohrer, gerd karl bin-
nig, scanning tunneling microscope. Url, In-
venture Place, [http://www.invent.org/book/
book-text/89.html](http://www.invent.org/book/book-text/89.html), 2000. 1