

Doorslaan in veld emissie

Leon Abelmann, Alexander le Febre

17 januari 2008

De Transducer Science and Technology groep (TST, ook wel bekend als MicMec), geleid door prof. Miko Elwenspoek, maakt onderdeel uit van de MESA⁺ and IMPACT onderzoeksinstututen. Het is een van de leidende groepen op het gebied van Micro System Technology (MST). Het onderzoek is geconcentreerd op het gebied van ontwerp en fabricage van Micro Electro Mechanical Systems (MEMS).

en zijn dus goedkoper per GByte en hebben een enorme capaciteit. Mechanisch geadresseerde geheugens zijn echter wel veel langzamer. Bovendien zijn mechanische systemen complex, en daarom is de *prijs per unit veel hoger*. Voor applicaties met een vaste hoeveelheid geheugen, zoals audio en video, zie je dan ook een migratie van mechanisch naar elektrisch geadresseerde geheugens. Een mooi voorbeeld is portable audio: walkman (magnetische tape) - discman (optische disc) - MP3 player (solid state Flash). Het gevolg is dat mechanisch geadresseerde geheugens steeds verder opschuiven naar toepassingen waar enorme hoeveelheden data opgeslagen worden: videorecorders, desktop PCs, servers. Hoe kleiner de bits, hoe meer data. Met meedogenloze vastbeslotenheid verdubbelen de magnetische en optische recording de datadichtheid binnen twee jaar. De kleinste magnetische bits zijn nu 17×94 nm (420 Gb/in² voor de kenner), kan het nog kleiner?

Loodrecht op deze beweging zien we een steeds verdere miniaturisering van mechanische geheugens. Het werkpaard van de harddisk industrie is de 2.5" disk, en Japanse wizzkids zijn bezig 0.8" microdrives in SD cards te proppen. Kan het nog kleiner?

Ja, het kan nog kleiner, maar het is niet makkelijk. Wat betreft de data-dichtheid loopt de magnetische recording industrie tegen een muur. De energie-dichtheid in magnetische materialen is niet erg groot. De bits zijn nu zo klein dat hun totale magnetische energie vergelijkbaar wordt met de thermische energie (kT). Het gevolg is dat als je niet oppast, de data spontaan verdwijnt. Uiteindelijk is natuurlijk alle data vluchtig, maar bij harddisks is het probleem acuut [2].

Er liggen mooie, maar ook ingewikkelde oplossingen op de plank. Maar bij 10 Tb/in² is het echt afgelopen [4], en dat is nog maar een factor 20 van-

Inhoudsopgave

- 1 **Introductie** 1
- 2 **De theorie...** 2
- 3 **... en de praktijk** 6

1 Introductie

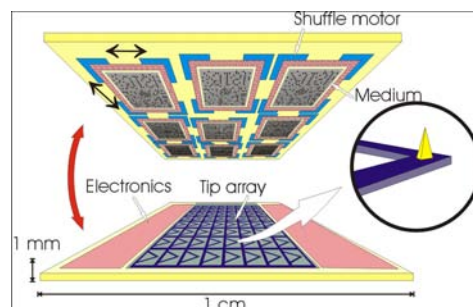
Dit verhaal gaat over doorslaan. Het vertelt iets technisch over doorslag in veldemissie, maar vooral hoe een promotie-onderzoek een promovendus tot wanhoop kan drijven, en hoe een begeleider voorkomt dat hij doorslaat. Het begint allemaal bij de hard disk. Dat is een mechanisch geadresseerd geheugen, net als de DVD of tape. Er zijn ook elektrisch geadresseerde geheugens zoals RAM en vooral FlashMemory. De snelle opmars van Flash is fascinerend, maar was eigenlijk voorspelbaar. Maar zo gaat het vaak: als voorspellingen werkelijkheid worden, zijn we iedere keer weer verbaasd.

De opkomst van Flash in allerlei consumer applicaties betekent niet dat de mechanisch geadresseerde geheugens op de vuilnisbelt kunnen. Omdat de afmetingen van de bits niet door lithografische technieken worden bepaald, zullen mechanische geheugens altijd een hogere dichtheid hebben

af nu. Zelfs als de groei afvlakt, is dat nog binnen 10 jaar! De afmetingen van een bit zijn dan in de orde grootte van een gemiddeld molecuul. Het ligt daarom in de verwachting dat we ergens in de komende 10 jaar een overgang van magnetische naar moleculaire, en uiteindelijk atomaire opslag gaan meemaken. En dat is geen lareikoek, atomaire opslag werd al gedemonstreerd in 2002 [1] met behulp van een Scanning Tunneling Microscoop (STM). Het is echter moeilijk voor te stellen hoe je met een kop die met 100 m/s over een schijf raast, moleculen of atomen kunt beschrijven. Waarschijnlijker is dat een soort scanning probe techniek, zoals STM wordt gebruikt. De demo had een belachelijk lage datarate van 150 bit/s, en zelfs als je alles uit de kast haalt wordt je uiteindelijk gelimiteerd door een fundamentele limiet van rond de 10 Mb/s.

De enige oplossing is om een groot aantal probes parallel te gebruiken, zoals in het probe storage systeem van IBM [3]. De probes zijn in een vierkant array van bijvoorbeeld 64×64 gepositioneerd (Figuur 1). Iedere probe leest en schrijft zijn eigen gebied. Aangezien de afstand tussen de probes minder is dan $100 \mu\text{m}$, hoeft het medium maar hele kleine afstanden af te leggen. Dat is dan meteen weer voordelig voor de access tijd. IBM is erg ver met deze techniek. De probes zijn ver doorontwikkeld (Figuur 2), en met een thermomechanische opslagtechniek zijn bitdichtheden tot 4 Tb/in^2 aangetoond, 10 keer zo hoog als voor magnetische recording. De techniek is echter niet geschikt voor moleculair opslag, maar daarover straks meer.

Met het grote aantal probes heeft de micromechanica zich stiekem in de recording industrie genesteld. En dat heeft bijkomende voordelen. Het IBM array is slechts $6 \times 6 \times 1 \text{ mm}$ groot, veel kleiner dan de kleinste microdrive. Het kan inderdaad dus nog kleiner! Omdat de af te leggen afstanden zo klein zijn, heeft het systeem een access tijd die minstens tien keer kleiner is dan de snelste harddisk. Het vermogensverbruik is dan ook nog eens op zijn minst 10 keer lager. Dat is een leuk speeltje, dat in SD cards en telefoons had gekund, als Flash niet zo verrekt dominant was geweest. De specificaties zijn echter zo interessant, dat deze techniek op een dag vast ergens toegepast zal worden. Bijvoorbeeld in archiving, een gebied waar we actief onderzoek op doen in het Europese FP6 ProTeM project (www.protem-fp6.org). Het idee is om 1 PByte (1000 TByte) in een doosje zo groot als een DVD



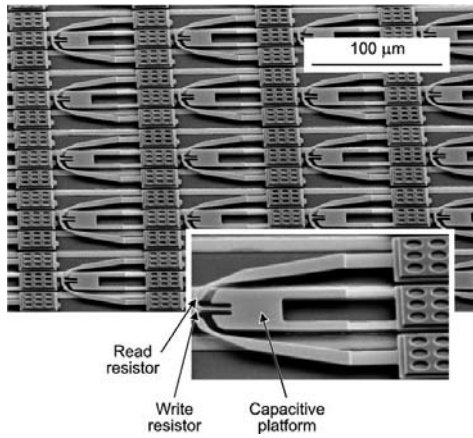
Figuur 1: Principe van een probe recording systeem. Een array van lees/schrijfkopjes (onder) is gepositioneerd tegenover een of meerdere XY positionerings-systemen. Iedere lees/schrijf kop, of probe, beperkt zich tot zijn eigen sector.

drive te stoppen...

In het IBM systeem zijn de probe-tips continu in contact met het opslagmedium. Dat gaat nog wel voor het thermomechanische principe dat in de Millipede wordt gebruikt, alhoewel slijtage een issue is. Maar voor moleculaire en atomaire opslag mag de tip niet meer over het oppervlak slepen. Dat betekent dat we een methode nodig hebben om de tip/medium afstand te regelen. Zo'n methode is ook nodig voor magnetische opslag en microscopie, een gebied waar de SMI groep ruim 30 jaar ervaring in heeft. Magnetische krachten zijn veel kleiner dan Van der Waals krachten, dus moet je met probes op een afstand van meer dan 5 nm blijven. In een magnetische kracht microscoop (MFM) doen we dat met feed-forward, maar in een probe recording device hebben we echt een feedback lus nodig. De opdracht was dus snel geformuleerd: *ontwikkel een methode om de tip/medium afstand in (magnetische) krachtmicroscopie te meten en te regelen.*

2 De theorie...

Nou, met zo'n opdrachtomschrijving kun je alle kanten op. Na flink wat gepluis in de literatuur kwamen we op twee methoden. Je kunt de demping van een trillende cantilever meten. Als de tip op de demping toe door dissipatieve tip/medium inter-



Figuur 2: Geavanceerd probe array uit de IBM keuken [3]

acties¹. De hoeveelheid energie die nodig is om de cantilever te laten trillen is dus een maat voor de tip/medium afstand, en geschikt om een regellus te bouwen. De methode is echter ingewikkeld, en moeilijk te implementeren. Bovendien was het al gedemonstreerd.

In de tweede methode meet je de tunnelstroom tussen de tip en het medium. Een tunnelstroom is een quantum-mechanisch effect, en daarmee dus meteen onbegrijpelijk. Het is ronduit belachelijk, maar volgens Heisenbergs onzekerheidsrelatie kunnen we van objecten niet tegelijkertijd weten hoeveel moment ze precies hebben, en waar ze precies zijn.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Heisenberg was ziek toen hij dat uitvond, en dat verklaart een hoop. Gelukkig is \hbar klein (10^{-34} Js), en bij normale voorwerpen hebben we geen last van Heisenberg. Maar voor hele lichte deeltjes, zoals electronen (10^{-30} kg), wordt het een probleem. Zo is er bijvoorbeeld een eindige kans dat een electron zich buiten een metaal bevindt. Die kans neemt snel af hoe verder je buiten het metaal komt, maar voor erg kleine spleetjes, ontstaat er een meetbare stroom. Electronen tunnelen dan van het ene metaal naar het andere door een isolerende gap (Direct

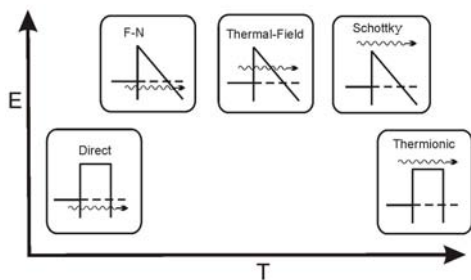
¹Het gebruik van ingewikkelde termen verhult vaak dat de auteur geen idee heeft wat er gebeurt

tunneling, het plaatje links onderin figuur 3). Deze tunneling stroom is sterk afhankelijk van de breedte van de barrière, en alleen waarneembaar voor afstanden kleiner dan een paar nm. Dat is te klein voor de toepassing die wij op het oog hebben, waarbij we meer dan 5 nm tip/medium afstand willen.

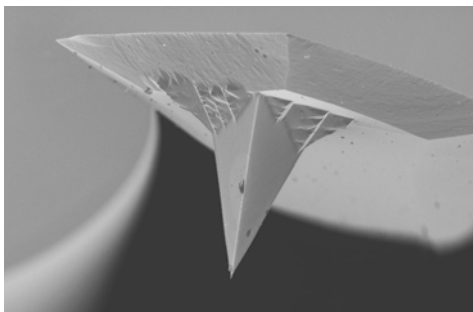
Een andere manier om de barrière smal te maken is door een flink elektrisch veld aan te leggen. Zoals je hebt geleerd (of zult leren) bij Halfgeleider Devices, vervormt de barriër daardoor. Bij een flink veld, wordt de barrière zo smal dat tunneling mogelijk wordt. Dit heet Fowler-Nordheim tunneling (figuur 3, linksboven). Het elektrische veld is evenredig met de aangelegde spanning gedeeld door de tip/medium afstand. Je kunt dus ook tunneling stromen krijgen op grotere afstand, als je maar voldoende spanning aanlegt. Wat in feite gebeurt, is dat de electronen tunnelen van het metaal naar het vacuum. (Natuurlijk worden ze vervolgens verzameld op het positief geladen medium). De zaken worden gecompliceerder als je het effect van thermische energie meeneemt. Electronen kunnen dan over de barrière heen springen, waardoor je niet-quantum-mechanische stromen krijgt zoals Thermionische emissie bij korte afstanden en Schottky emissie bij hoge velden (Rechterkant figuur 3). En eigenlijk vindt alles tegelijkertijd plaats, en krijgen we zoiets vaags als thermal field emission, wat je meteen weer mag vergeten.

Direct tunneling stromen worden gebruikt om atomen zichtbaar te maken in Scanning Tunneling Microscopie (STM), waarbij de electronen van de atomen in de tip naar de atomen in het medium tunnelen. Dit gebeurt bij relatief lage spanningen ($< 1V$) op heel korte afstand (< 1 nm), dus bij heel hoge resolutie. De Fowler-Nordheim tunneling stroom wordt gebruikt bij Field Emission, bijvoorbeeld in displays en electronen microscopie. Het is ook de methode waarmee data in Flash geheugen wordt opgeslagen. Maar je kunt er ook een tip/medium afstand mee meten, op grotere afstand en daarom met lagere resolutie. Field emission microscopie was zelfs de voorloper van STM, een apparaat dat de poëtische naam ‘Topografiner’ mee kreeg in 1972[6].

De resolutie van de topografiner was naar huidige maatstaven niet erg imposant, zo’n 400 nm. Met huidige gadgets zou dat nu beter moeten kunnen. We hebben nu prachtige probes, met hele scherpe puntjes (Figuur 4). Als je een tip/medium span-



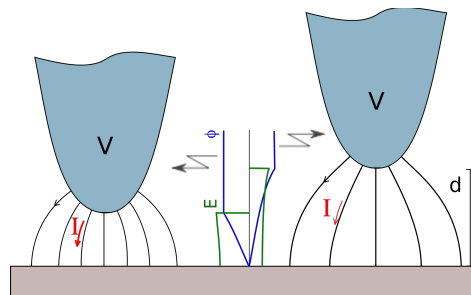
Figuur 3: Electronen kunnen op verschillende manieren voorbij een barrière, afhankelijk van temperatuur en energie



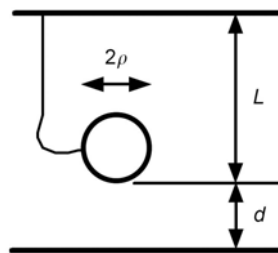
Figuur 4: Scanning Electron Microscopy opname van een tip zoals die in dit onderzoek is gebruikt.

ning aanlegt krijg je daardoor al bij lage spanningen een enorm hoog veld aan de tip. De barrière wordt dan smal en er gaat een tunnelstroom lopen. De breedte van de barrière, dus de stroom, is sterk afhankelijk van de tip/medium afstand (Figuur 5).

Hupsakee, dat is dan geregeld. We nemen een tip, positioneren die boven een medium, zetten een paar Volt erop en meten de stroom terwijl we de tip over het medium bewegen. Niet moeilijk, dat konden ze 35 jaar geleden al. Een kind doet de was, dus een promovendus doet veld emissie! Natuurlijk is er dan ook nog de formaliteit van een proefschrift. Een proefschrift zonder formules is geen goed proefschrift - er moet hier en daar wel gemystificeerd worden. Stel je voor, straks denkt iedereen dat hij/zij de doctorstitel kan halen... Dus we halen onze kennis van EM-veld op en gaan uitrekenen hoe groot het veld aan de tip is. Aangezien we bij EM-veld alleen hebben geleerd met platen, cilinders en bollen te rekenen, vereenvoudigen we ons probleem



Figuur 5: Principe van field emission microscopie. De tunnelstroom is afhankelijk van de sterkte van het elektrische veld (groene curve), dus omgekeerd evenredig aan de tip/medium afstand bij een vaste tip/medium spanning. In de rechter situatie is de veldversterking geschetst door een lichte toename van het elektrische veld dicht bij de tip. De veldlijnen zijn zwart weergegeven, de potentiaal in blauw.



Figuur 6: Mathematische vereenvoudiging van een tip voor elektrostatiche berekeningen

tot een bol tegenover een plaat (Figuur 6). Aha, dat was een werkcollege-opgave: bereken het veld van een uniform geladen bol tegenover een geleidende plaat. Dat doe je met spiegeladingen enzo. Het elektrische veld vlak bij de bol kan iedere EL student uitrekenen en wordt

$$E_x(d) = \frac{V}{d} \left(\frac{(2d + \rho)^2 + \rho^2}{2(2d + \rho)\rho} \right) \quad (2)$$

In de limiet voor d gaat naar nul krijg je gewoon het veld van een vlakke plaat condensator $E = V/d$. Bij een toenemende afstand neemt het veld toe, je kunt dan van een veldversterking spreken. Voor $d \gg \rho$ wordt de versterkingsfactor d/ρ .

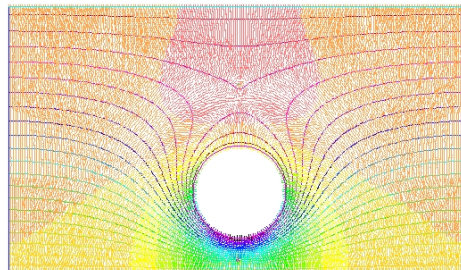
De benadering met een uniform geladen bol is na-

tuurlijk niet helemaal correct. In de eerste plaats is de lading niet uniform verdeeld over de bol, de meeste ladingen zullen aan de kant zitten die het dichtst bij het medium is. In de tweede plaats is de tip gemonteerd op een geleider. Zoals aangeven in figuur 6, moeten we een geleider aannemen op afstand L achter de bol, op dezelfde potentiaal. Dit is niet meer met de wet van Gauss op te lossen. We zullen de complete Laplace vergelijking moeten nemen en moeten overgaan op een numerieke methode. Dat is minder moeilijk dan je denkt. Er zijn kant-en-klare pakketten beschikbaar die dat voor je doen en je kunt het leren in het mastervak EMStatics.

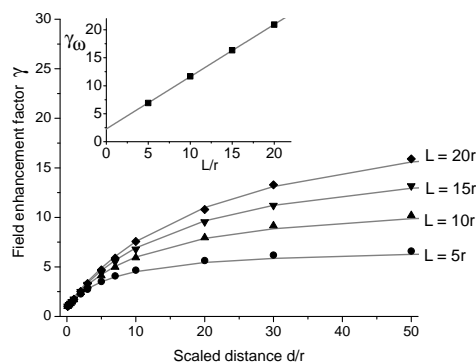
Wij hebben voor dit probleem het open source programma FreeFEM++ gebruikt (www.freefem.org). Je programmeert de geometrie, definieert de randvoorwaarden en het programma doet de rest. Het resultaat is te zien in figuur 7. Zowel de equipotentiaalijnen als het elektrische veld zijn geplot. De kleurcodering in het elektrische veld geeft de sterkte aan. Zoals het hoort staat het veld loodrecht op de equipotentiaalijnen ($\mathbf{E} = -\nabla\phi$). En zoals verwacht is het veld onderaan de bol het sterkst.

We kunnen nu een serie simulaties draaien voor verschillende waarden van L/ρ en d/ρ en de veldversterkingsfactor berekenen. Het resultaat is te zien in figuur 8. Voor kleine afstanden zien we inderdaad een lineaire afhankelijkheid met d/ρ , maar voor grote afstand lijkt de waarde te verzadigen naar $2.5 + L/\rho$ (inset). In het gebied waar wij werken, bij $d/\rho \approx 1$, varieert de veldversterking dus het meest, al is de totale versterking nog niet zo groot. Bij een toename in de afstand zal de veldversterking dus snel toenemen en hebben we niet heel veel meer spanning nodig om de veldemissie stroom te laten lopen. Een hogere veldversterking helpt ons dus om de benodigde spanningen binnen de perken te houden: scherpe tips is dus het devies.

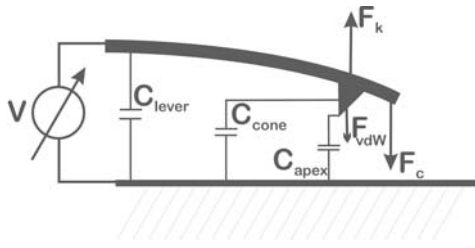
Nu we toch zo lekker aan het rekenen zijn, kunnen we meteen meenemen wat er gebeurt als de tip op een cantilever zit. Er gaat dan niet alleen een veldemissie stroom lopen, maar de cantilever zal ook doorbuigen ten gevolge van de elektrostatische kracht. Hoe je dat uitrekent heb je geleerd bij Mechanica en Transductietechniek. De elektrostatische kracht is proportioneel met de verandering van de capaciteit, bij gelijkblijvende spanning



Figuur 7: Resultaat van eindige elementen simulatie (FEM)



Figuur 8: Relatieve versterking van het veld ten opzichte van een vlakke plaatcondensator, voor verschillende tip hoogten



Figuur 9: Rekenmodel voor de doorbuiging van een probe ten gevolge van een potentiaalverschil

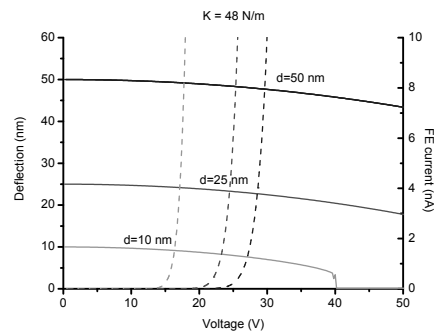
$$F = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} V^2. \quad (3)$$

We hoeven dus niets anders te doen dan de verandering van de capaciteit van het systeem te berekenen bij variërende tip/medium afstand. Dat kan analytisch, numeriek, of je kijkt gewoon goed in de literatuur en schrijft het antwoord over [5] ... De doorbuiging van de cantilever volgt dan simpelweg uit Hooks wet $\Delta z = F/K$. Zoals je bij MechTrans hebt geleerd is dit systeem niet stabiel. Als je de spanning laat toenemen en de veer meer dan 1/3 van de afstand heeft afgelegd, knalt het systeem in elkaar. Als de veerconstante K dus te klein is, ram je de tip in het medium voordat de spanning hoog genoeg is om een fatsoenlijke veldemissie stroom te laten lopen. Een veerconstant van 45 N/m blijkt voldoende groot te zijn. In figuur 10 hebben we alle theorie bij elkaar gevoegd, en de veldemissie stroom berekend als functie van de spanning. Parameter in deze grafiek is de tip/medium afstand bij $V=0$. Als we op 10 nm beginnen (lichtgrijze curve), krijgen we een veldemissie stroom (streepjes) bij 15 V. De cantilever buigt dan nog nauwelijks door (getrokken lijn). Bij grotere beginafstanden, hebben we natuurlijk meer spanning nodig.

Het lijkt erop dat we dit systeem aardig begrijpen. Ach, wij dolenden in de duisternis!

3 ... en de praktijk

En wordt het nu tijd voor wat experimenten. Je hebt geen idee wat er allemaal wel niet mis kan gaan. Je begint met wat goede spullen en tast diep in de buidel voor een UHV scanning probe systeem (figure 11). Nou moet je niet denken dat je zoiets



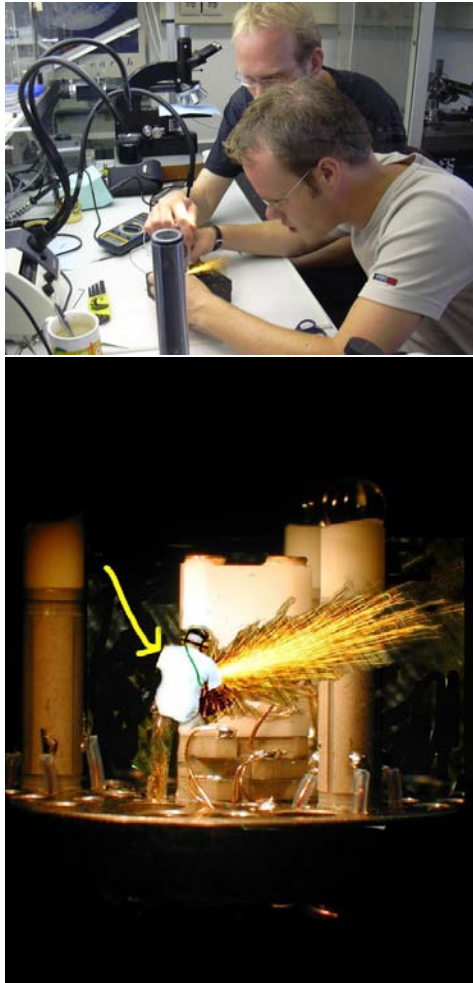
Figuur 10: In een grafiek de doorbuiging van de tip (linker as, getrokken lijnen) en de veldemissie stroom (rechteras, gestippelde lijn)



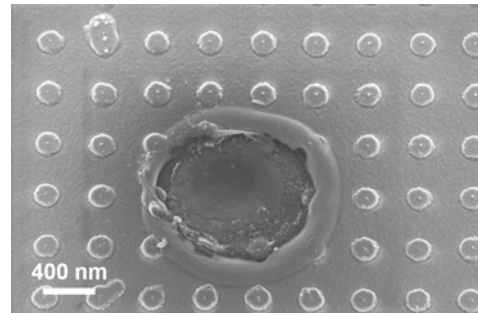
Figuur 11: UHV STM

aanzet en er mee kan werken. Het duurt een jaar voordat je zo'n systeem aan de praat hebt en alle kinderziekten uitgebannen zijn (figure 12, rechts). Er zit bijvoorbeeld altijd wel ergens een kortsluiting, waardoor je in vacuum doorslag krijgt. Het drijft de goedwillende promovendus tot wanhoop.

Als het systeem dan eindelijk doet waarvoor het bedoeld is, is het resultaat teleurstellend. In plaats van nette veldemissie-stromen krijgen we curves die meer weg hebben van beurskoersen. Het is een grote bende van ruis, stappen, drop-outs. En dan grote stilte... Verbeten onderwerpen we onze samples aan inspectie met een Scanning Electronen microscoop. En denk niet dat dat makkelijk is: een gebied van $1 \mu\text{m}^2$ vinden op een sample van 1cm^2 is vergelijkbaar met een speld in een hooiberg. Maar uiteinde-



Figuur 12: Kleine modificaties aan het systeem. Boven, overview. Onder, zoom in op de cruciale activiteiten



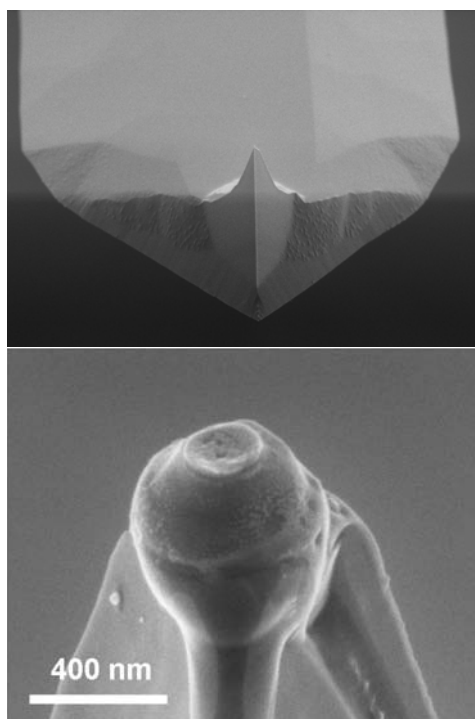
Figuur 13: Resultaat van het contact van een tip met het sample, zonder serie weerstand

lijke vindt de nu getergde promovendus het resultaat van zijn inspanning: een gruwelijke krater die niets te maken heeft met de fijnzinnige experimenten die hij had willen uitvoeren (Figuur 13). Blijkbaar heeft de tip een gat in het sample gebrand. Oeps, en hoe zou de tip er dan wel niet uitzien: het resultaat verbaasde niemand (Figuur 14).

Na een periode van krachtige verwensingen, gevolgd door een diepe depressie, worden de benen op tafel gegooid en wordt nagedacht. Wat zijn we nou eigenlijk aan het doen?

Ik neem een metalen plaatje (sample) en sluit die aan op aarde. Ik neem een scherp draadje (cantilever met tip) en sluit die aan op een 50 V voeding. Dan breng ik die tip dicht bij het sample. Wat gebeurt er als het draadje het plaatje per ongeluk raakt...

Misschien is het een goed idee om een serieweerstand in het circuit op te nemen. Ja, je lacht daar nu om, maar dat lachen zal je snel vergaan. Net als de promovendus in dit drama. Zelfs met een 100 M Ω weerstand, blijven we doorslag houden. In een uiterste poging hebben we zelfs de tip van een diamant coating voorzien, maar het resultaat blijft om te huilen (Figuur 15). Die serieweerstand zit tussen de voeding en de cantilever. Maar de cantilever vormt met het sample een capaciteit (Figuur 9) van ongeveer 1 pF. Bij contact ontladde die capaciteit zich door de tip. Omdat het contactoppervlak maar een paar nanometer is, krijg je toch nog hoge stroomdichtheden. En daar stopt de trein, het is binnen de promotie niet meer mogelijk



Figuur 14: Dit gebeurt er met een Si tip als je zonder serie weerstand het sample raakt. Doorslag!

cantilevers met ingebouwde weerstanden te maken.

Toch blijkt de serie-weerstand de ergste ellende te voorkomen. Er kunnen veldemissie-curves worden genomen, en het sample wordt niet al te ernstig beschadigd. De promovendus wordt er zelfs handig in, en we kunnen heel veel metingen doen voordat we een keer per ongeluk het sample raken. Toch is de lijdensweg nog niet voorbij. Op de een of andere manier blijkt zich allerlei troep te verzamelen in het gebied tussen tip en sample. Na een paar maanden experimenteren, komen we tot de conclusie dat verontreinigingen op het sample door de elektronen worden “gekraakt” tot koolstof. Het proces is zelfs erg reproduceerbaar en precies (Figuur 16). Achteraf blijkt het logisch: je brengt een elektrode dicht bij een oppervlak met spanningen van boven de 10 V. Dan krijg je natuurlijk chemische reacties.

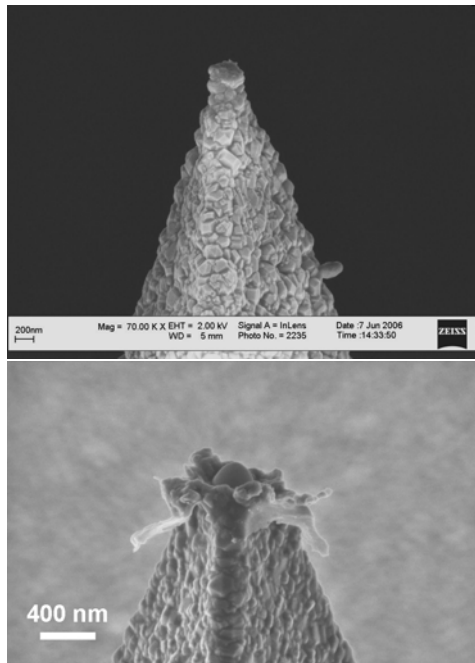
Met de moed der vertwijfelden haalt de promovendus alles uit de kast om het sample en de tip van verontreinigingen te ontdoen. En dan, na drie jaar gewroet, blijkt het systeem min of meer te doen wat we zo optimistisch hadden berekend. Figuur 17 laat zien dat we de afstand tussen tip en sample kunnen regelen door de aangelegde spanning te variëren, met een precisie van ongeveer 10 nm. In dit experiment wordt de emissie-stroom constant gehouden door de tip/sample afstand te variëren. Door de stabiliteit van de veldemissie stroom te verbeteren kunnen we ook de precisie verhogen.

Het werkt! We kunnen het bijna niet geloven. Na vier zware jaren hebben we eindelijk een resultaat dat we kunnen publiceren. Maar denk niet dat het makkelijk is. Ieder voorstel om met behulp van veldemissie tip-sample afstanden te regelen, zal door ons met een minzame glimlach worden ontvangen. Als geoefende Zen meesters zullen wij beginners onderrichten. Wij slaan niet meer door!

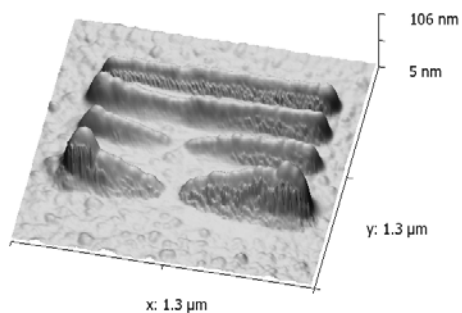
Het proefschrift behorend bij dit drama zal binnenkort in de pers verschijnen en op 28 maart 2008 worden verdedigd. Het is bij de auteurs tegen een geringe versnapering te verkrijgen

Referenties

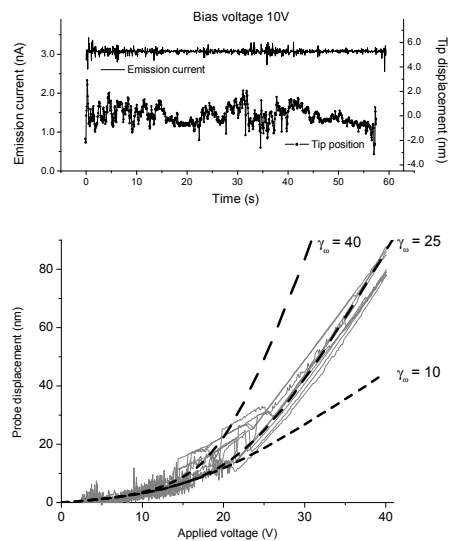
- [1] R. Bennowitz, J. N. Crain, A. Kirakosian, J. L. Lin, J. L. McChesney, D. Y. Petrovykh, and F. J. Himpsel. Atomic scale memory at a silicon surface. *Nanotechnology*, 13:499–502, 2002. Cited By (since 1996): 29. 1



Figuur 15: Zelfs met een serieweerstand en diamant coating is de tip niet bestand tegen doorslag.



Figuur 16: De elektronen kraken koolwaterstof verbindingen op het oppervlak van het sample. Het proces is redelijk reproduceerbaar, en maar moeilijk te voorkomen.



Figuur 17: Maar als alles dan werkt, blijkt het principe van field emission distance control het prima te doen (boven) en hebben we een uitstekende fit aan het model (onder).

- [2] S. H. Charap, P. L. Lu, and Y. He. Thermal stability of recorded information at high densities. *IEEE Trans. Magn.*, 33(1):978–983, 1997. 1
- [3] A. Knoll, P. Bachtold, J. Bonan, G. Cherubini, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, B. Gotsmann, W. Haberle, C. Hagleitner, D. Jubin, M. A. Lantz, A. Pantazi, H. Pozidis, H. Rothuizen, A. Sebastian, R. Stutz, P. Vettiger, D. Wiesmann, and E. S. Eleftheriou. Integrating nanotechnology into a working storage device. *Microelectronic Engineering*, 83:1692–1697, 2006. Export Date: 27 October 2006. 1, 2
- [4] Thomas Thomson, Leon Abelmann, and Hans Groenland. Magnetic data storage: Past, present and future. *in: Azzerboni et al, Magnetic Nanostructures in Modern Technology (Springer)*, pages 237–306, 2008. 1
- [5] J. Toset, I. Casuso, J. Samitier, and G. Gomila. Deflection–voltage curve modelling in atomic force microscopy and its use in DC electro-

static manipulation of gold nanoparticles. *Nanotechnology*, 18(015503):015503, 2007. 2

- [6] Russell Young, John Ward, and Fredric Scire. The topografiner: An instrument for measuring surface microtopography. *Review of Scientific Instruments*, 43(7):999–1011, 1972. 2