

Prisværdig overfladefysik med scanning tunneling mikroskopi

Flemming Besenbacher, Erik Lægsgaard og Ivan Stensgaard

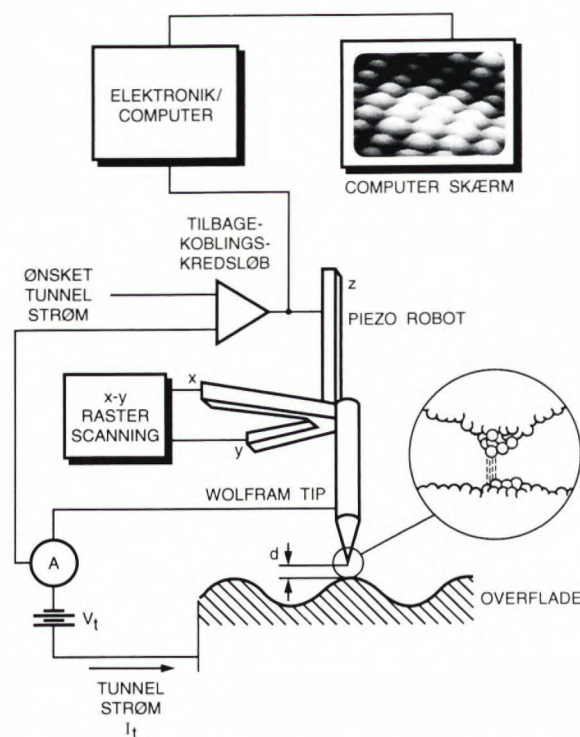
Center for Atomic-scale Materials Physics (CAMP) og Institut for Fysik og Astronomi (IFA), Aarhus Universitet

Overfladefysik - studiet af de yderste atomlag af et fast stof - har gennem de sidste tyve år været og er stadig en af de hurtigst voksende grene af fysikken. Der er mange grunde hertil. På den ene side er overfladen hjemsted for en lang række grundforskningsmæssigt interessante processer, der ikke har paralleller i det faste stof eller i gasfasen. Samtidig har mange af de grundvidenskabeligt interessante overfladefænomener stor betydning for forståelsen af teknologisk vigtige områder som f.eks. katalytiske reaktioner og tribologi (d.v.s. læren om friktion, adhæsion/vedhæftning, slid og smøring). Overfladefysik foregår traditionelt på enkeltkrystal-overflader og under et så ultra højt vacuum (UHV) at kun meget få luftmolekyler rammer overfladen i løbet af et eksperiment. Man kan derfor spørge hvorfor overfladefysik har relevans for de ovennævnte, vigtige teknologiske områder, hvor de normale forhold er højt tryk, komplicerede overflader og måske høj temperatur? En række studier har imidlertid vist, at velkontrollerede enkrystal-overflader under rene, velkontrollerede UHV-forhold er gode modelsystemer for studiet af de elementære, industrielle processer. Heterogen katalyse f.eks. er bestemt af katalysatorens evne til at binde molekyler til overfladen (adsorption), bryde de molekylære bindinger (dissociation), stoffernes evne til at bevæge sig rundt på overfladen (diffusion) og til at reagere samt sandsynligheden for at reaktionsprodukterne forlader (desorberer) overfladen. På baggrund af en detaljeret mikroskopisk forståelse af disse delprocesser på modeloverflader har det vist sig muligt at forudsige f.eks. aktiviteten af en katalysator under industrielle forhold. Det er altså muligt at bygge bro mellem en grundvidenskabelig, detaljeret beskrivelse af givne overfladefysiske/kemiske processer på en atomar skala og forståelsen af industrielle, komplicerede reaktionsforhold.

Der er i de senere år sket et betydeligt forskningsmæssigt gennembrud i vor basale forståelse af overflader og overfladerelaterede processer. Dette skyldes ikke mindst udviklingen af Scanning Tunneling Mikroskopet (STM), som har gjort det muligt at studere strukturen af overflader med atomar opløsning, d.v.s. atom for atom. Et tilsyneladende uopnåeligt ønske om at kunne "se" de enkelte atomer på en plan enkrystal-overflade under UHV-forhold er således blevet realiseret.

I 1986 påbegyndte vi, på universitetet i Århus, opbygningen af et scanning tunneling mikroskop (STM). Vores STM afviger fra andre tilsvarende instrumenter, derved at det er muligt at optage flere STM billeder i sekundet, i modsætning til andre tilsvarende mikroskoper, hvor en typisk scannetid er 0,5-1 min. Dette har

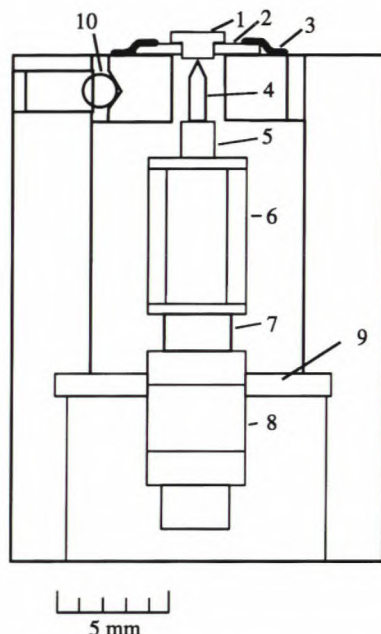
gjort det muligt ikke blot at studere den statiske struktur af overflader på en atomar skala, men samtidig få vigtig information om dynamiske processer på overflader. Endvidere er vort STM meget stabilt, hvilket har gjort det muligt rutinemæssigt at opnå atomar opløsning selv på de tætpakkede metaloverflader, hvilket generelt er vanskeligt med et konventionelt STM.



Figur 1. Principskitse af et STM. En tynd, spids metalnål er placeret på en "piezo-robot", der kan bevæge nålen i X-, Y- og Z-retningen med en opløsning på omkring 1 pm. Lægges en besked (0,1 - 2 V) spænding mellem nål og en elektrisk ledende overflade, vil der kunne trækkes en svag strøm i kredsløbet, når afstanden d bliver meget lille (≈ 0.5 nm). Ved hjælp af et tilbagekoblingskredsløb holdes afstanden d konstant, medens nålen scannes i et liniemønster hen over overfladen. Hermed kan prøvens topografi bestemmes helt ned på det atomare niveau.

Princippet bag et STM

Et scanning tunneling mikroskop (figur 1) er baseret på den kvantemekaniske effekt kaldet tunneling, der tillader elektroner at passere, *tunnelere*, gennem tynde isolerende områder der ifølge klassisk ellære ikke ville



Figur 2. Vores STM. 1) Prøve, 2) Prøveholder, 3) Fjeder, 4) Wolfram-nål, 5) Nålholder, 6) Scannerrør, 7) Aksel, 8) Piezo-motor, 9) Fastgørelse og 10) Kvartskugle. Læg mærke til de små dimensioner. Billedet til højre viser et fotografi af instrumentet.

lede strømmen.

En tynd, spids metalnål (wolfram), der er pålagt en spænding V_t på 0,1 - 2 Volt i forhold til en ledende overflade, er placeret tæt ved denne, men uden metallisk kontakt. Ifølge den klassiske fysiks love vil man ikke forvente at registrere nogen strøm på det viste amperemeter, idet elektroner ikke kan passere energibarrieren (vakuumgabet), der eksisterer mellem nålen og overfladen. Hvis imidlertid afstanden d mellem nålen og overfladen bliver meget lille (≈ 0.5 nm), vil nålens og overfladens elektronfordelinger begynde at overlape, og der er en vis sandsynlighed for, at elektroner kan trænge gennem energibarrieren (tunnelere) og give anledning til en lille strøm $I_t \approx 1$ nA.

Nålen forskydes (scannes) nu hen over overfladen som elektronstrålen i et TV-kamera. Scanningen foretages med piezo-elektriske elementer, der har den egenskab, at de ændrer form, når de pålægges et elektrisk felt; de kan blive længere og tyndere eller kortere og tykkere. Under nålens afsøgning af overfladen vil tunnelstrømmen I_t øges (mindskes), når nålens afstand til overfladen aftager (vokser).

Nu er overfladen måske uregelmæssig eller en smule skrå i forhold til den retning man bevæger nålen i. Nålen ville derfor i praksis hurtigt miste kontakten eller ramme overfladen. Derfor holder man i ethvert STM I_t konstant ved hjælp af et tilbageløbskredsløb, der hele tiden regulerer spændingen på z-piezo-elementet og dermed nålens højde over overfladen. Ved at registrere spændingen på z-piezo-elementet under scanningen får man derfor information om overfladens topografi, eller rettere elektronfordelingen i overfladen.

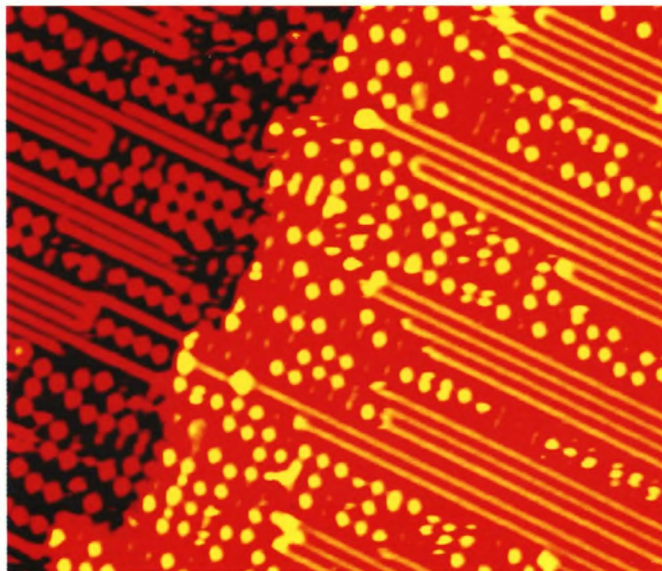
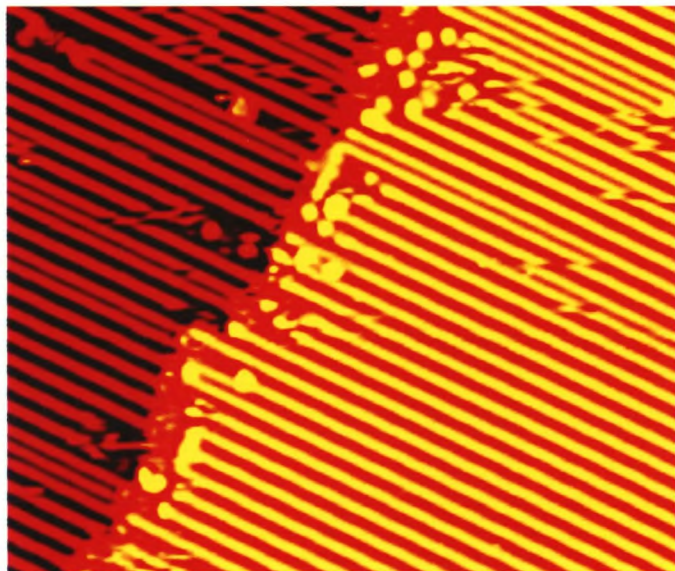
Man kan med rette spørge om, hvorledes det er muligt at se enkelte atomer, idet dette kræver, at spidsen af nålen ikke er meget større end et enkelt atom (tænk på et STM som en "atomar gramfon"). Her hjælper naturlovene os, idet det viser sig, at tunnelstrømmen er yderst følsom overfor ændringer i afstanden. Tunnelstrømmen kan skrives:

$$I_t \propto V_t \cdot \exp(-A \cdot d \cdot \sqrt{\phi}) \quad (1)$$

hvor A er en konstant, d er afstanden mellem nål og overflade og ϕ er middelhøjden af potentialbarrieren mellem nål og overflade (typisk nogle få eV). Den eksponentielle afhængighed er så kraftig, at hvis d ændres med 0.1 nm giver det anledning til en strømændring på en faktor 10. Dette bevirker, at hvis der på en makroskopisk spids nål er et atom, der "stikker" 0.1 nm længere frem end de øvrige, vil dette ene atom bære 90% af tunnelstrømmen.

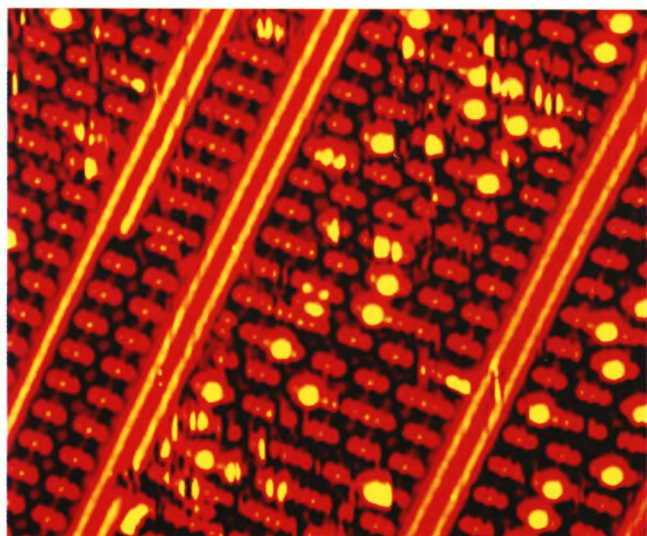
Selv om princippet bag et STM således er forbløffende simpelt, så er et af hovedproblemerne i konstruktionen, at man skal stabilisere afstanden mellem nålen og overfladen på en sub-Ångstrøm skala ved hjælp af konstruktionselementer, der måske er af størrelsesordenen centimeter. Dette span på mere end otte størrelsesordener bevirker, at konstruktionen ofte kan være meget følsom over for mekaniske rystelser og termisk drift.

Det af os udviklede STM er vist i figur 2. De små dimensioner minimerer behovet for ydre dæmpning for indflydelsen af støj fra vibrationer i laboratoriet. Piezobotten består af et kompakt scannerrør (6). Ved hjælp af elektriske spændinger kan scannerrøret bevæges nogle få mikrometer i X- og Y-retningerne, mens det kan flyttes knapt en mikrometer i Z-retningen. Det er meget



Figur 3. En kemisk reaktion på en sølvoverflade observeret med atomar opløsning. På billedet til venstre ses rækker bestående af sølv- og iltatomer næsten vinkelret på et atomart step. Efter reaktion med kuldioxid er der dannet karbonat-ioner (de lyse punkter på billedet til højre). Reaktionen starter ved stepkanten og breder sig i begge retninger. Samtidig er de resterende sølv-ilt-rækker presset sammen. Begge billeder er $25 \times 25 \text{ nm}^2$.

ubekvem at skulle montere en prøve indenfor en så lille tolerance, så vi har monteret scannerrøret på en aksel (7), der glider i tætpassende lejer i en piezo-motor (8). Piezo motoren giver en lineær bevægelse i skridt på ned til 0.2 nm med en hastighed på op til 1 mm/min



Figur 4. Samme overflade som vist på figur 3, men med større forstørrelse ($15 \times 15 \text{ nm}^2$) og færre karbonat-ioner. Den nye struktur domineres af triplets, hvor karbonat-ionerne sidder over det centrale atom.

Det kompakte design, den symmetriske opbygning og den tætte mekaniske kobling mellem prøven og mikroskophuset mindsker indflydelsen fra ydre vibrationer og termiske påvirkninger. Ligeledes sørger dette design for at de mekaniske resonanser i systemet ligger på meget

høje frekvenser. Dette, sammen med fuldstændig computerkontrol, gør, at vi er i stand til at optage billeder i så hurtig rækkefølge, at vi kan visualisere overfladereaktioner ved STM-film. Disse film kan så senere studeres i detalje.

Kemiske reaktioner på overflader

Kemiske reaktioner på faste stoffers overflade spiller en meget vigtig rolle i det moderne samfund. Drivmidler, kemikalier og gødning fremstilles alle ved katalyse, ligesom løsningen af fremtidens miljø- og energiproblemer i stor grad vil afhænge af nye og bedre katalysatorer.

Indtil nu er der foretaget et ret lille antal undersøgelser af specifikke overfladereaktioner med STM. STM-billederne af adsorption af kemisk vigtige atomer, såsom brint, kul, ilt og svovl har haft stor indflydelse på den måde, overfladen bliver opfattet på. Førhen har man betragtet overfladen som en slags perfekt, statisk "skakbræt", på hvilket atomer kunne sætte sig, kombinere og desorbere. Resultaterne fra STM har vist, at overfladen derimod skal opfattes som et langt mere dynamisk medium, der hele tiden ændrer sin lokale atomare struktur som respons på tilstedeværelsen af reaktanterne på overfladen. Det betyder, at der er en kraftig kobling mellem bindingen af gasatomer til overfladen og en ændring af overfladens struktur. Metal-metal-bindinger brydes og nye metal-gas-bindinger dannes. Dette betyder imidlertid også, at overfladens detaljerede, geometriske struktur har stor betydning for forståelsen af reaktioner på overflader.

Ethylenoxid ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) er et vigtigt mellemled i produktion af ethylenglycol, der anvendes til polyester, kølervæske, m.m.. Ethylenoxid dannes ved en katalytisk reaktion mellem ethylen (C_2H_4) og ilt. Katalysatoren

består af sølvpartikler spredt på en såkaldt bærer. Som et biprodukt ved reaktionen dannes der kuldioxid, hvis tilstedeværelse på overfladen påvirker både aktiviteten og selektiviteten i processen. Det er derfor af stor interesse at forstå vekselvirkningen mellem kuldioxid og ilt på en sølvoverflade. Vi har studeret denne reaktion med STM. Figur 3(a) viser et område af en Ag(110) krystal med et atomart step, der skiller to terrasser. De lyse områder ligger højest og de mørke lavest. Næsten vinkelret på steppet, langs (001) retningen, ses rækker, der består af sølv og ilt. Disse rækker er dannet ved en reaktion mellem ilt fra gasfasen og sølvoverfladen på en måde, der er meget analog til dannelsen af tilsvarende rækker på Cu(110) og Ni(110). (Se eventuelt KVANT nr. 1, februar 1991). Eksponeres denne overflade nu til CO₂, sker der følgende (figur 3(b)): En reaktion, i hvilken der dannes karbonat (CO₃), starter ved steppet og udbreder sig i begge retninger langs rækkerne, der samtidig komprimeres. (Karbonat-ionerne ses som lyse kugler.) Vi kan heraf slutte, at iltatomerne i enden af Ag-O-rækkerne til enhver tid er de mest aktive reaktionspladser. Ved at tælle atomer kan støkiometrien i reaktionen endvidere fastlægges.

Overfladens dynamiske karakter afspejles i endnu en omstrukturering i forbindelse med karbonatdannelsen. Det fremgår af figur 4, der er optaget over et 15×15 nm² område med relativt få karbonat-ioner, at den nye struktur er domineret af triplets, hvor karbonat-ionen sidder over det centrale atom. Ved stuetemperatur "hopper" karbonat-ionerne rundt på overfladen - derfor er der afbildet halve og kvarte ioner.

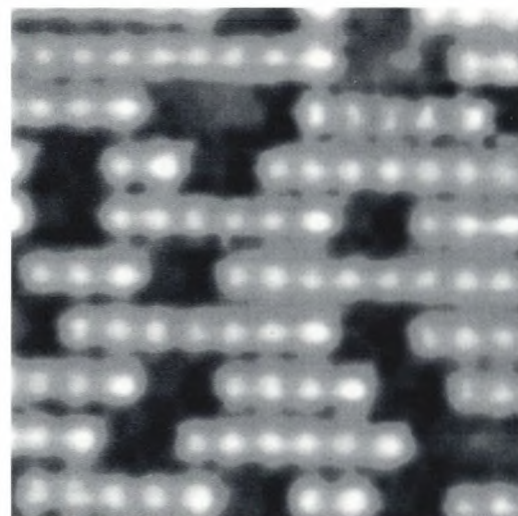
Vi kan altså nu studere overfladereaktioner på atomart niveau, men det ultimative mål er naturligvis at kunne følge reaktionerne in situ under mere realistiske reaktionsbetingelser (højt tryk og temperatur). Hertil kræves en nyudvikling af mikroskopet, som vi håber at gennemføre i de kommende år.

Syntese af nye overfladelegeringer

I vores grundforskningscenter CAMP er forskningen koncentreret om den grundlæggende forståelse af materials egenskaber samt syntese og manipulation af materialer på en atomar skala. Som et eksempel på det sidste har vi i CAMP fundet en helt ny type todimensionale (2D)-legeringer, *overfladelegeringer*. Det er velkendt, at en række metaller danner stabile legeringer med hinanden, mens andre metaller ikke er blandbare. Det overraskende er, at selv for den sidste gruppe af ikke-blandbare metaller, kan der dannes overfladelegeringer, og denne 2D-fase har ingen 3D-analogi i det faste stof.

Guld og nikkel er eksempler på ikke-blandbare metaller, idet opløseligheden af Au i Ni ved stuetemperatur er utrolig lille, ligesom Au har en væsentlig lavere overfladeenergi end Ni. Fra alle tidligere teorier for metal-på-metal-vækst ville man derfor have forventet, at guldet groede i krystaller oven på nikkel overfladen. Imidlertid har vore STM-studier vist, at hvis

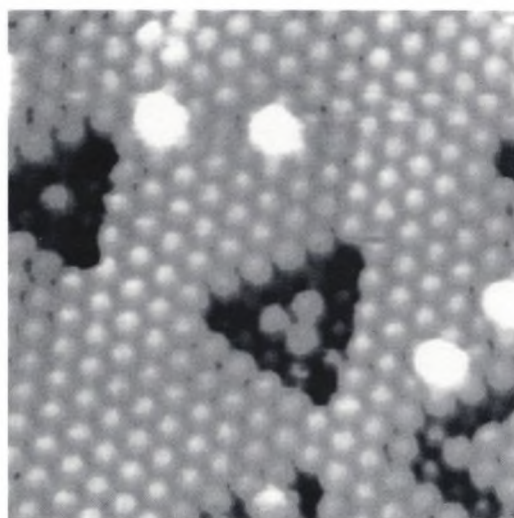
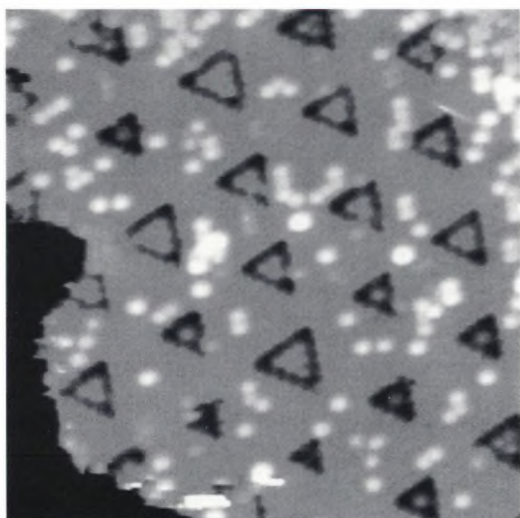
Au fordampes på en nikkeloverflade der er skåret så overfladetætheden af nikkelatomer bliver så lille som mulig ((110)-overfladen), diffunderer Au-atomerne langs de tætpakkede Ni-rækker, indtil Au-atomerne et givet sted skubber Ni-atomerne ud og sætter sig på Ni-atomernes positioner (se figur 5). De Ni-atomer, der er skubbet ud af overfladen, samler sig i Ni-øer på overfladen, og vi kan vise, at der er en 1:1 sammenhæng mellem antallet af Au-atomer i overfladen og arealet af Ni-øerne. Også på Ni(111)-overfladen blandes Au og Ni under dannelse af en overfladelegering, men da (111) er tættere pakket end (110)-overfladen, kræver det mere energi at bryde Ni-bindingerne på (111)-overfladen, hvorfor legeringsdannelsen på Ni(111)-overfladen først sker ved 250°C.



Figur 5. En (110) nikkeloverflade med 0,25 monolag pådampet guld. Nikkel og guld legerer normalt ikke, men på denne overflade erstatter guldatomer enkelte nikkelatomer i det første lag (overfladelegering). Guldatomerne ses som mørke huller på overfladen, der har en størrelse på 3,5×3,5 nm².

Inden for CAMP har vi vist, at den overraskende overfladelegeringsfase er et resultat af mange-legemennaturen af de interatomare vekselvirkninger i metalliske systemer. Nikkelatomerne i overfladen har færre naboer end Ni-atomerne inden i det faste stof, d.v.s. at overfladeatomerne er underkoordinerede. Guldatomerne er større og har større elektrontæthed end Ni-atomerne, og Au-atomerne hjælper Ni-atomerne med at blive mindre underkoordinerede. Fra samspillet mellem eksperiment og teori er der udviklet en model, der endvidere kan forudsige, hvilke metaller, der danner overfladelegeringer, og hvilke, der ikke gør det.

Med opdagelsen af *overfladelegeringer* er der åbnet for muligheden for at designe overfladestrukturer med egenskaber, som ikke kan etableres i 3D-fasen af det faste stof, og som ikke afhænger af temperaturen og omgivelsernes kemiske sammensætning. Dette er muligt, fordi den andel metal, der er tilsat overfladen, ikke kan forsvinde ved at diffundere ind i værtsmetallet. Denne form for overfladestrukturer kan have stor betydning for adhæsionen



Figur 6. En (111) nikkeloverflade ((a) $12 \times 12 \text{ nm}^2$ og (b) $4.5 \times 4.5 \text{ nm}^2$) med et enkelt lag pådampet guld. Her lægger guldatomerne sig på overfladen, men på grund af guldets større gitterkonstant opstår der så store spændinger, at det underliggende nikkellag visse steder ændres ved, at enkelte atomer frigøres. Her kan guldatomerne så synke ned, og de tre mørke trekanter viser dette. I trekanterne ses 1, 3 og 6 guldatomer. De lyse pletter er nikkelatomer, og tæller man op, er der netop det antal, man forventer fra antallet og størrelser af trekanterne.

af et materiale til et andet. En anden åbenlys anvendelse af overfladelegeringerne er i forbindelse med modifikation af den kemiske aktivitet af en overflade. Der åbnes herved muligheder for på molekylært niveau at designe katalysatorer med forbedret reaktivitet og selektivitet. Disse spændende muligheder undersøges for øjeblikket inden for "Center for Overfladereaktioner" i samarbejde med overfladefysikgruppen på DTU og Haldor Topsøe A/S.

Studier af grænsefladen mellem to metaller

Strukturen af grænsefladen mellem et pådampet metal-lag og en metaloverflade har stor betydning for adhæsionen mellem de to metaller og dermed de mekaniske/tribologiske egenskaber af det kombinerede system. Vi har for nylig vist, hvorledes det også er muligt at studere strukturen af denne grænseflade på en atomar skala.

Betrages igen guld-nikkel-systemet, og fordampes et enkeltatomart lag Au på Ni(111)-overfladen ved stuetemperatur, observeres en regelmæssig trekantstruktur i Au-overlaget (se figur 6a). I større forstørrelse (figur 6b) ses det, at trekantområderne omslutter 1, 3, 6, .. Au-klynger, men man ser også Au-atomer i trekantgrøfterne. Løsningen på denne struktur blev fundet gennem et samspil mellem eksperiment og teori inden for CAMP. Da guld har en 16% større gitterkonstant end nikkel, er der en fejltilpasning mellem Au-gitteret og det underliggende Ni-gitter. Dette resulterer i en stor spænding i Au-Ni-grænsefladen, og denne spænding udløses ved dannelse af dislokationer, d.v.s. områder, hvor der er store ændringer i de interatomare afstande, og som adskiller

områder med mere normale gitterafstande. I det konkrete tilfælde udløses spændingen ved, at en række Ni-atomer skubbes ud af Ni(111)-overfladen. Ni-laget rearrangerer sig efterfølgende ved dannelsen af trekantområder. Strukturen af Au-laget afspejler således den underliggende struktur af grænsefladen, idet Au-atomerne synker længere ned langs de mere åbne trekantlinier. Nikkelatomerne, der er skubbet ud, ses som de "lyse" atomer i Au-laget, som de er inkorporeret i.

Nanotribologi

Når to materialer kommer i kontakt med hinanden sker det ikke over hele overfladen på en gang. Den ruhed, som enhver overflade har, gør, at de mest fremspringende dele danner en række små kontakter. Det er disse kontacters egenskaber, der bestemmer f.eks. adhæsionen, friktionen og det slid, som de to materialer udøver på hinanden, når de gnides mod hinanden. Vi har udviklet en eksperimentel metode, der gør det muligt, mellem to materialer, at danne kontakter, der kun er få atomer i diameter. Kontakterne dannes ved på velkontrolleret vis at bevæge STM-nålen mod en enkrystal-overflade. Ved en afstand på $\sim 0.2 \text{ nm}$ bliver de tiltrækkende adhæsive kræfter mellem nålen og overfladen så store, at nålen springer til punktkontakt med overfladen. Når nålen igen trækkes bort fra overfladen trækkes stoffet ud til en tråd. Efterhånden bliver kontakten eller nanotråden tyndere og tyndere for til sidst at knække. Nanotrådene har en diameter på $\sim 0.3\text{--}1 \text{ nm}$ og en længde på $\sim 1\text{--}2 \text{ nm}$. Når kontakten er dannet, kan trådens egenskaber studeres i stor detalje. Vi har fundet (se figur 7), at den elektriske ledningsevne i nanotråden er kvantiseret i enheder af $2e^2/h = 77.5 \mu\text{Siemens}$

Complete Optical Answers



Optics is providing the answers for many of today's new technologies and applications. Melles Griot's Application Engineers are trained to help you find those answers with our versatile range of optical tools. Answers that translate into working, valuable, real-life products.

Our carefully specified range of optical components — lasers, opto-mechanical hardware, and instrumentation; plus our complete line of optical tables, breadboards, and workstations — are all designed

to work together, with metric and inch systems equally supported.

All components are integrated into a versatile family of optics and support equipment designed with your requirements in mind.

From small-scale, non-linear devices to high performance imaging systems, from the infrared to the near UV, our products provide the reliable quality and dependable performance that you can rely on.

For the OEM we provide large volumes of custom components and sub-systems optimized for your specific needs — with major North American, Asian and European optical fabrication and coating facilities for worldwide support.

Warehouses around the world provide prompt shipment of our standard products and our toll free telephone makes us easy to reach. Just part of the reason why Melles Griot should be your source for complete optical answers.

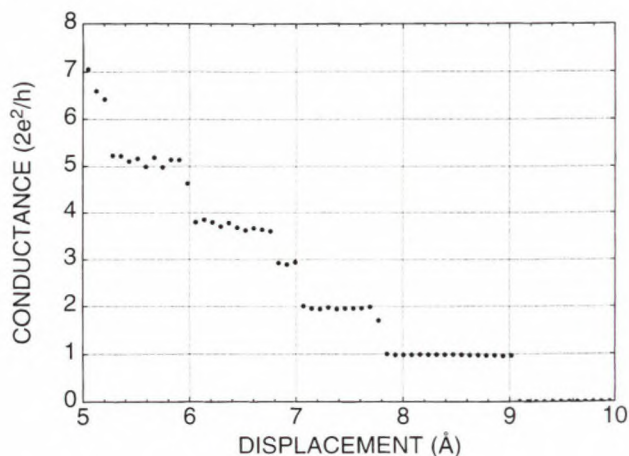
MELLES GRIOT

OPTICS • LASERS • RESEARCH EQUIPMENT

MELLES GRIOT DANMARK
Stenagervej 13
DK-4100 RINGSTED

Phone +45 53 61 50 49
Fax. +45 53 61 60 49

$= (12,9 \text{ k}\Omega)^{-1}$. Den teoretiske analyse af eksperimenterne har vist, at mens elektronerne frit kan bevæge sig langs nanotråden, så er den vinkelrette elektronbevægelse i nanotråden kvantiseret, hvilket resulterer i den målte, kvantiserede ledningsevne.



Figur 7. Kvantisering af den elektriske ledningsevne i en tynd tråd. Det ses, at der er tydelige foretrukne ledningsevner i enheder af $2e^2/h$, efterhånden som tråden trækkes længere og dermed tyndere, indtil tråden knækker ved ca. 0.9 nm.

Ud over den fundamentale interesse, der ligger i at studere den elektriske ledningsevne i sådanne nanostrukturer, har vi med disse studier vist, at vi nu kan danne rimeligt velkontrollerede punktkontakter mellem to metaller, hvilket betyder, at vi kan begynde at studere tribologi på en atomar skala. Det, der mangler, er metoder til at studere kræfterne mellem de to materialer, der bringes i kontakt, hvilket vi for øjeblikket er ved at udvikle. Tribologi er, som nævnt tidligere, læren om adhæsion, friktion, slid og smøring, og mens disse fænomener årligt koster industrien milliarder af kroner, er der p.t. ingen detaljeret mikroskopisk forståelse for de grundlæggende mekanismer bag disse fænomener. Det er håbet i CAMP og i "Center for Nanotribologi" gennem et koordineret eksperimentelt og teoretisk studie at forstå, hvad der på det atomare niveau bestemmer materialers vedhæftning, friktionskræfterne mellem dem, og hvorledes disse påvirkes ved at adsorbere forskellige atomer og molekyler på overfladen, d.v.s. indflydelsen af "smøremidler". Vi har ved opbygningen af vores mikroskop og tilhørende vakuumudstyr profiteret af den fantastisk gode tekniske infrastruktur, der eksisterer på Institut for Fysik og Astronomi i Århus. I forbindelse med tildelingen af NKT-prisen skal der lyde en stor tak til de

mange teknikere og ingeniører fra IFA, der gennem årene har hjulpet os på forskellig vis. Dette forskningsprojekt er også et godt eksempel på, hvorledes private fonde hurtigt og målrettet var parate til at hjælpe til med ekstern finansieringsstøtte, idet vi i 1987 hurtigt blev hjulpet i gang med støtte fra Knud Højgaards fond og Aarhus Universitets Forskningsfond. Forskningsprojektet blev efterfølgende konsolideret gennem deltagelse i et centre under MUP1-programmet, "Center for Overfladereaktioner", hvor vi havde et yderst frugtbar og stimulerende samarbejde med overfladefysikgrupperne på DTU og RISØ samt forskningsafdelingen fra Haldor Topsøe A/S. Dette samarbejde er senere fortsat i et MUP2-center, ligesom vi i MUP2-regi har fået bevilget endnu et center, "Center for Nanotribologi". I dette center har vi et samarbejde med Danmarks Teknologiske Institut i Århus (Tribologicerter Århus) og derigennem med Danfoss, Grundfos og NKT. Sidst, men ikke mindst, har vores forskning fået endnu et løft, da vi i samarbejde med teorigruppen på DTU fik bevilget grundforskningscenteret, CAMP, under Danmarks Grundforskningsfond. Det har endelig været en stor glæde at se vor STM-prototype blive kommercialiseret af firmaet DME A/S i Herlev, der i dag sælger mikroskopet over hele verden.



Figur 8. Billede af en guldbelagt nikkeloverflade, hvorpå der er skrevet bogstaverne CAMP. Strukturene er skabt ved at presse nålespidsen på et Scanning Tunneling Mikroskop 2 nm ind i overfladen i udvalgte punkter. Billedstørrelsen er ca. $100 \times 50 \text{ nm}^2$. Opgave: Hvor mange sider (60 linier á 80 karakterer) kan man skrive på en frimærkestor overflade med denne teknik? (Red.)