DE FØRSTE ANVENDELSER AF HØJ-TEMPERATUR SUPRALEDERE

Jørn Bindslev Hansen, Danmarks Tekniske Højskole

Baggrund

Igennem de sidste 20 år har lav-temperatur supraledere (niobium og niobium-forbindelser) fundet stigende kommerciel anvendelse såvel inden for stærkstrømsteknik: spoler, som inden for elektronik: følsomme magnetometre (SQUID's - se forklaring i boks på næste side). Desuden bruges niobium til radiofrekvens-resonatorer i de store partikel-acceleratorer og til højfrekvens-detektorer i radioteleskoper.

Da de keramiske supraledende cuprater La-Ba-Cu-O (Bednorz og Müller) og Y-Ba-Cu-O (Chu et al) blev opdaget i 1986-87, blev der brugt store ord om de tekniske vidundere, som disse materialer kunne frembringe. Fysikere sammenlignede med tæmningen af ilden og opfindelsen af hjulet og den elektriske pære. Magnetisk svævende tog mellem København og Paris og supraledende stærkstrømskabler blev nu rentable. Begejstringen smittede. En husejer, som stod over for at skulle trække nye ledninger i sin ejendom, ringede og spurgte, om han skulle lægge almindelig kobberledning, eller om han burde vente indtil han kunne købe de nye supraledende ledninger.

Med fire års afstand til opdagelsen af høj-temperatur supraledning er det muligt at få et bedre overblik over mulighederne for tekniske anvendelser. Det følgende er en personlig vurdering af de materialetekniske problemer og perspektiverne for anvendelserne.

Materialeegenskaber

Siden 1986 er der publiceret mere end 12000 artikler om høj-temperatur supraledere. Der er indtil nu fundet i al fald fem familier af oxider, som med rimelig kan betegnes som høj-temperatur supraledere. Der er fire grupper af kobberoxider og en gruppe af bismutoxider. Overgangstemperaturerne ligger mellem 20 og 130 Kelvin med kobberoxiderne (doterede cuprater) i toppen. Selv i normaltilstanden (f.eks. over overgangstemperaturen) er materialernes elektriske og magnetiske egenskaber eksotiske (to-dimensionelle, antiferromagnetiske, konstant temperaturkoefficient for restitiviteten). Som noget ganske usædvanligt kan materialerne ved øget dotering ændres fra at være isolatorer over halvledere til supraledere. Teoretikerne er på sporet af beskrivelsen for den normale tilstand i materialerne, men endnu langt fra at forstå supraledningen. Udviklingen af nye endnu bedre materialer foregår derfor for en stor del i blinde.

De keramiske egenskaber medfører en række materialetekniske problemer: høj-temperatur supralederne er hårde og sprøde (de er ikke duktile), de kan ikke loddes, og overfladen er ikke kemisk stabil overfor ilt. Et ændret iltindhold kan betyde, at supraledningen forsvinder. Nogle af materialerne indeholder barium og reagerer også med vand og kuldioxid. Herudover er de typisk stærkt anisotrope på grund af deres to-dimensionale opbygning, således at de supraledende egenskaber afhænger kritisk af kvaliteten og orienteringen af krystalstrukturen. I keramisk, polykrystallinsk form hænger materialerne derfor meget dårligt sammen rent elektrisk. Orienterede krystaller med en vis overfladebeskyttelse er klart den ideelle form.

Alt i alt medfører disse egenskaber, at det har vist sig at være endog overordentligt vanskeligt at fremstille brugbare polykrystallinske elektriske komponenter af materialerne. Således er udviklingen af polykrystallinske tråde og bånd gået meget langsommere end ventet. Alligevel er der grund til en vis optimisme: den maksimale spændingsløse strømtæthed (den kritiske strømtæthed), som begrænses af korngrænserne, ligger nu over $5 \cdot 10^4$ A/cm^2 for de bedste tråde ved 77 K (i realistisk magnetfelt). En forbedring med en faktor 10 er tilstrækkelig til at gøre trådene interessante til stærkstrømsanvendelser (spoler, generatorer, strømskinner, kabler). Der er grund til at tro, at det vil lykkes i løbet af de næste 3-5 år. I Danmark arbejder NKT A/S og Haldor Topsøe A/S med disse problemer, bl.a. støttet af ELSAM, ELKRAFT og Industri- og Handelsstyrelsen.

Epitaksielle tyndfilm er tynde lag af ensrettede krystaller dyrket på krystallinske substrater (med passende gitterstruktur og udvidelseskoefficient). Sådanne tyndfilm af høj-temperatur supraledere fremstilles nu rutinemæssigt verden over ved flere forskellige groningsmetoder, i Danmark på NKT A/S ved hjælp af laser-forstøvning. Ved 77 K ligger den nuværende verdensrekord for kritisk strømtæthed, J_c, på 10^7 A/cm^2, og NKT's tyndfilm hører til blandt de bedste ($J_c(77K) = 4 \cdot 10^6$). Andre fremstillingsmetoder som sputtering, fordampning (molekylær-stråle-epitaksi, MBE) og kemisk krystaldyrkning fra dampfaser (CVD) giver også gode epitaksielle tyndfilm. Sputtering og MBE bruges også her i landet (Forskningscenter Risø, H.C. Ørsted Institutet og Danmarks Tekniske Højskole). Økonomisk støttes den danske tyndfilmsindsats af de statslige forskningsråd SNF og STVF, Industri- og Handelsstyrelsen, ELSAM, Bdr. Hartmanns Fond, Dannins Fond og Fisker og Nielsens Fond.

Anvendelser af tyndfilm

På nuværende tidspunkt er de epitaksielle tyndfilm klart den bedste formgivning for de kendte høj-temperatur supraledere. Som det fremgår af ovenstående, er fremstillingsmetoderne de samme som inden for halvleder-forskning og -industri. Det er derfor epitaksielle tyndfilm, der ligger til grund for de første anvendelser: mikrobølgekomponenter og magnetometre (SQUID's = Superconducting Quantum Interference Device). Heraf er førstnævnte i form af tyndfilms-filtre og -resonatorer blevet udbudt kommercielt inden

JOSEPHSON-EFFEKTEN

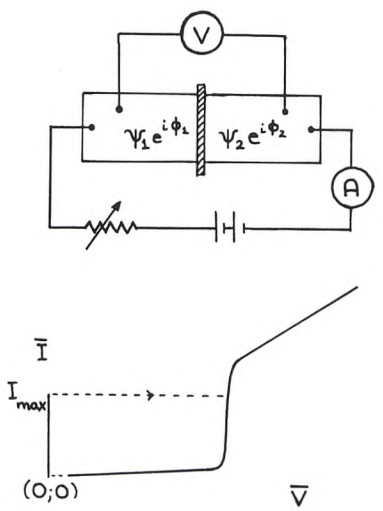
Den kvantemekaniske tunneleffekt spiller en stor rolle i atom- og faststof-fysikken. Den beskriver passagen af partikler gennem områder af rummet, som de ifølge den klassiske fysik ikke kan passere. Det kan for eksempel være elektroners bevægelse gennem tynde isolerende lag (tunnel-barrierer), der forstås som et udslag af elektronens bølgeegenskaber, idet en del af elektronernes bølgefunktion udbreder sig til barrierens anden side og dermed giver en vis sandsynlighed for at elektronen kan optræde der.

Tunneleffekt udnyttes i Josephson overgangen (eller på engelsk: Josephson junction), den fundamentale supraledende elektriske komponent, der indgår som den aktive komponent i al supraledende elektronik. En Josephson overgang består af to supraledere adskilt af et mikroskopisk lille område, hvor supraledningen er svækket eller helt undertrykt (f.eks. et 2 nm tyndt isolatorlag), som vist på figuren.

I 1962 forudsagde Brian Josephson, at supraledende Cooperpar kan trænge gennem en tynd barriere mellem to supraledere med stort set samme sandsynlighed som enkelt elektroner. Denne kohærente tunneleffekt, som kort tid efter blev observeret af Philip W. Anderson og John M. Rowell, ses som en betragtelig spændingsløs tunnelstrøm (en superstrøm) mellem de to supraledende områder.

I hvert område er Cooperparrene kvantemekanisk set beskrevet ved en bølgefunktion. Interferens mellem de to bølgefunktioner giver sig udtryk i superstrømmen $I_s = I_{max} \sin \delta\phi$ gennem tunnel-overgangen, hvor $\delta\phi$ er faseforskellen mellem de to bølgefunktioner. Den maksimale strøm I_{max} afhænger af de supraledende materialer, af geometrien og af temperaturen.

Hvis den påtrykte strøm overstiger I_{max} bæres en del af strømmen som en Ohmsk strøm, der medfører et spændingsfald V over Josephson overgangen. Superstrømmen vil da oscillere med frekvensen $\omega_J = 2eV/\hbar$, Josephson-frekvensen, som typisk ligger i mikrobølgeområdet ($2e/h$ = 484 GHz/mV). Denne frekvens svarer til den Bohrske frekvensbetingelse for udsendelse eller modtagelse af fotoner i en proces, hvor en partikel (et Cooperpar) med ladningen $2e$ gennemløber spændingsfaldet V.

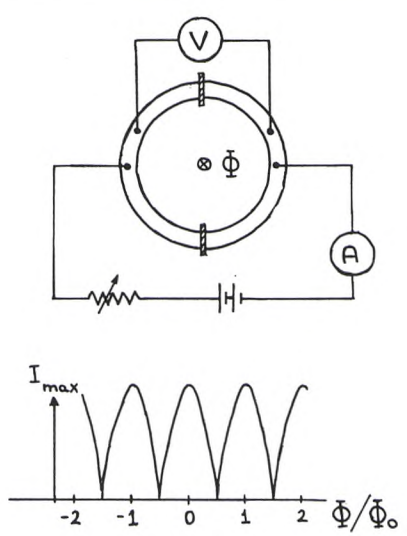


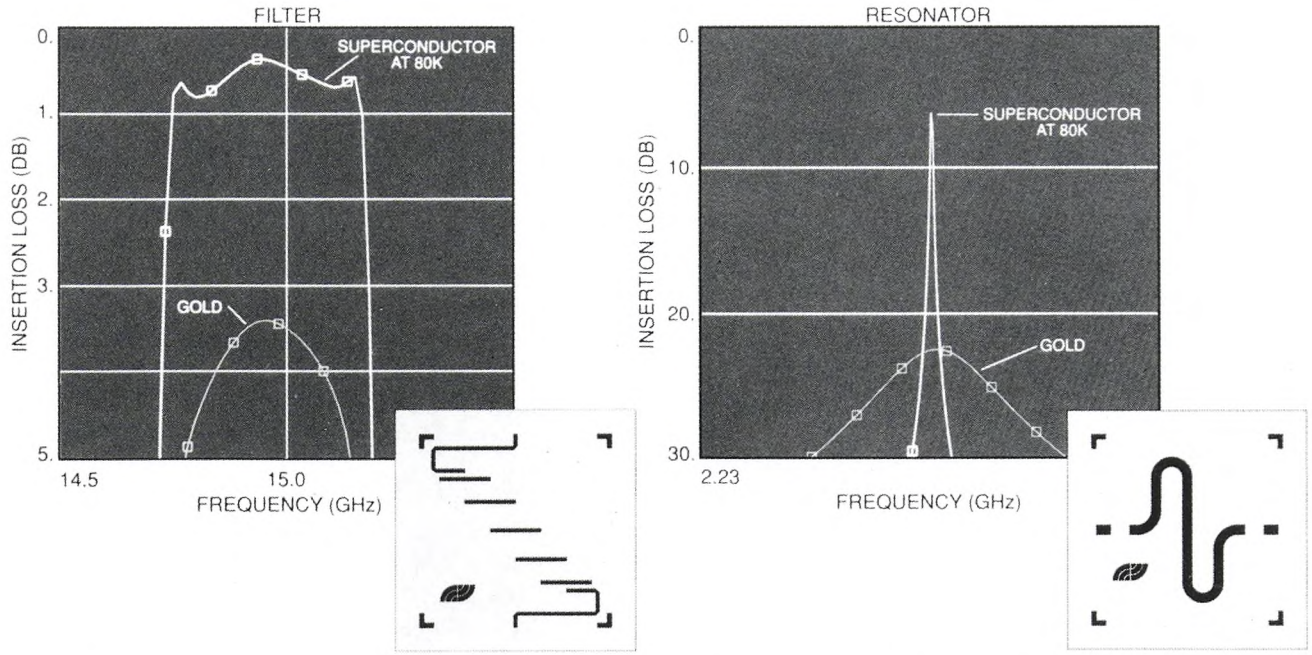
SQUID

På baggrund af Josephson-effekten kan man konstruere et meget præcist magnetometer baseret på den såkaldte SQUID, Superconducting QUantum Interference Device.

Som vist i figuren består en SQUID af en supraledende ring med en eller flere Josephson overgange. Interferensen mellem en magnetisk fluks Φ og faseforskellen(e) over Josephson overgangene medfører, at den maksimale ydre spændingsløse strøm, der kan overføres til ringen, varierer periodisk med Φ med perioden $\Phi_0 = h/2e$ = 2.07 fWb = 2.07 10^{-15} Vs, flukskvantet.

SQUID'en er derfor en ultrafølsom flukssensor, som danner basis for meget følsomme elektriske målinger. Følsomheden for energi rækker helt ned til kvantegrænsen.





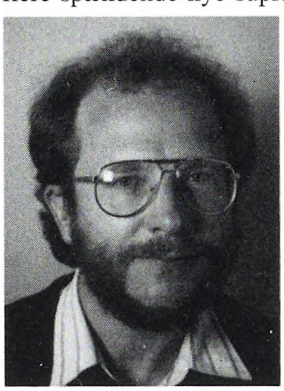
Figur 1. Frekvenskarakteristikken for de første kommercielle anvendelser af høj-temperatur supraledere. Firmaet ''Superconductor Technologies'' fra Kalifornien tilbyder filtre og resonator tyndfilmskredse som vist her.

for det sidste halve år, se figur. Til kompakte mikrobølgekredse i området fra 1 GHz til 100 GHz er det afgørende at reducere overfladetabet i ledermaterialet. Her har de epitaksielle høj-temperatur tyndfilmskredse ved 77 K 30-100 gange mindre tab end kobberkredse ved samme temperatur. Et godhedstal på over 10.000 kan opnås. Dette kan som nævnt udnyttes i filtre og resonatorer. De gode højfrekvens-egenskaber er også vigtige for hurtige transmissionslinier, f.eks. computere (''interconnects''), hvor miniaturiseringen ned til 0.25 mikrometer ledningsbredde vil medføre store problemer med parasitiske modstande i normale metaller som kobber og aluminium. Hybride halvleder-superleder kredse er under udvikling.

Prototyper af følsomme SQUID-magnetometre er fremstillet af flere laboratorier, f.eks. IBM og Hitachi. De udviser nu ca. 10^3 gange for stor lavfrekvens-støj ($1/f$ fluks-støj) til at være konkurrencedygtige over for lavtemperatur niobium-SQUIDs, men deres ydeevne forbedres til stadighed med stormskridt (faktor 10^4 i løbet af de sidste to år) i takt med fremstillingen af epitaksielle tyndfilm med bedre og bedre strømbærende egenskaber. De bedste høj-temperatur supraledende magnetometre har i dag i området over 1 kHz samme følsomhed som de tilsvarende kommercielle lav-temperatur SQUIDs, ca. 10^{-2} pT/(Hz)$^{1/2}$. Til medicinske formål er et håndbåret 77 K magnetometer en attraktiv anvendelse (magnetocardiografi).

Sammenfatning

Mange materiale- og lavtemperatur-fysikere drømte i mange år om supraledning ved flydende kvælstoftemperatur (77 K). Drømmen blev til virkelighed i 1987, men de keramiske supraledere viser sig at være vanskelige at tæmme. De tilhører gruppen af ''odd materials''. I polykrystallinsk form f.eks. til tråd og bånd begrænser korngrænserne den kritiske strømtæthed og et længerevarende udviklingsarbejde forudses. Der er gjort afgørende fremskridt indenfor fremstillingen af teknisk anvendelig epitaksial tyndfilm til brug i mikroelektronik. Disse orienterede krystallinske tynde lag kan nu fremstilles på en lag række underliggende substrater (silicium, safir, magnesiumoxid, lantanaluminat, zirkonia, strontiumtitanat). De første tyndfilmskredse er til salg, og mange flere vil følge i de kommende år ikke mindst i form af hybride halvleder-supraleder komponenter og i form af følsomme magnetometre. Parallelt med denne udvikling arbejdes der på højtryk verden over for at forklare og forudsige høj-temperatur supraledning og på at finde endnu flere spændende nye supraledere.



Jørn Bindslev Hansen Lic.scient. i 1981 fra Københavns Universitet. Lektor ved Fysisk Laboratorium I på Danmarks Tekniske Højskole.