HØJ-TEMPERATUR SUPERLEDNING - DEN DANSKE INDSATS

Torsten Freltoft, NKT

Efter opdagelsen af de keramiske superledere i slutningen af 1986 var der også i Danmark stor interesse for at arbejde med udviklingen og forståelsen af de nye materialer. Der var allerede fra begyndelsen lagt op til, at indsatsen skulle være *koordineret*, og man dannede et koordinationsudvalg med repræsentanter fra de mest interesserede institutioner og virksomheder. Som talsmand for udvalget valgtes Sektionsleder Mourits Nielsen, Fysikafdelingen, RISØ. Efter en hastebevilling givet af Statens Naturvidenskablige Forskningsråd og Industri & Handelsstyrelsen til projektet i 1988 blev superlederprojektet i 1989 til et rammeprogram indenfor Det Materialeteknologiske Udviklingsprogram, og koordinationsudvalget fortsatte som styregruppe for rammebevillingen. Endvidere er der givet betydelig støtte til superleder forskningen fra de to danske el-forsyningsselskaber ELSAM og ELKRAFT.

I alt ti offentlige institutter samt to private firmaer har deltaget aktivt i projektet. Det relativt store antal deltagende offentlige laboratorier afspejler dels den store interesse, som højtemperatur superledning har blandt danske forskere, dels at det har været en nødvendighed for at kunne udnytte et tilstrækkeligt bredt udvalg af eksperimentelle teknikker. Tabellen angiver de deltagende parter samt de *hoved*aktiviteter eller faciliteter, de hver har bidraget med.

For at samordne indsatsen og øge samarbejdet indenfor de forskellige hovedaktiviteter er der oprettet tre arbejdsgrupper:

1: Kemi og materialer
   Syntese af materialer og pulverteknologi samt komponenter baseret på disse.
2: Fysik
   Teoretisk arbejde samt elektriske, magnetiske og strukturelle aspekter.
3: Film
   Tyndfilm produktion og komponenter. Deponeringsteknikker: laser forstøvning, sputtering og MBE teknologi.

I det følgende gives et kort overblik af arbejdet og resultaterne indenfor hver af disse arbejdsgrupper, og til sidst kikker vi nærmere på evalueringsrapporten. I en separat artikel beskrives i større detalje et af hovedresultaterne indenfor projektet, nemlig fremstillingen af krystallinske superledende tyndfilm med kritiske strømtætheder op til 10^7 A/cm^2 målt ved flydende kvælstofs temperatur, 77 K.

Tabel I Deltagere og hovedaktiviteter i rammeprogrammet for højtemperatur superledning.

Deltager	Hovedaktiviteter
HCØ	
Fysisk Laboratorium	Grundlæggende teori
	Ion-bestråling
Kemisk Lab. IV	MBE film teknik
NORDITA	Teori for fluxbevægelse
DTH	
Fysisk Lab. I	Superledende film og komponenter
Fysisk Lab. III	Magnetiske og elektriske egenskaber
Lab. for Tekn. Fysik	Elektronmikrosopi (TEM)
Kemisk Lab. B	Struktur kemi, Røntgen analyser
Inst.f. Mineralindustri	Keramik teknologi, pulverfremstilling
RISØ	
Fysikafdelingen	Neutron og røntgen diffraktion
	Neutron bestråling
Aarhus Universitet	Faststof kemi
	Krystal dyrkning
Haldor Topsøe A/S	Bulk superledere
	Varmepresning
	Smelte-texturering
	Superledende tråde
NKT A/S	Tyndfilm, laser forstøvning
	Tyndfilmslitografi
	Superledende tråde

Kemi/materiale gruppen.

Formålet har her været at udvikle *pålidelige* metoder til produktion af høj-kvalitets pulver af de forskellige superledende materialer. Materialerne har hovedsageligt været anvendt til targets for tyndfilm-deponering, superledende tråde, strøm begrænsere samt til studier af processer, der kan orientere mikrokrystallerne i et pulver. I begyndelsen af projektet kastede de fleste af de deltagende institutter og virksomheder sig ud i materialefremstilling, men i de sidste par år har aktiviteterne været koordineret, så pulverudvikling varetages af IMI og HTAS.

Superledende tråde er fremstillet på NKT ved at fylde sølvrør med superledende pulver og derefter trække og valse sølvrøret, så det superledende pulver komprimeres, og derved fremstilles et langt fleksibelt bånd. For at skabe elektrisk kontakt mellem de enkelte superledende korn må

båndet sintres ved temperaturer omkring 900 °C, hvorefter hele båndet er superledende. Til gengæld taber tråden sin fleksibilitet ved varmebehandlingen. Med denne metode er der opnået kritiske strømtætheder i nærheden af 1000 A/cm^2 målt ved 77 Kelvin. Dette er af samme størrelsesorden som de strømme, man almindeligvis kan sende gennem en kobbertråd. De opnåede resultater er derfor ikke umiddelbart anvendelige til praktiske formål. Her kræves strømtætheder, der er 10 til 100 gange større, for at det kan betale sig at udnytte superledere frem for normale metaller.

Problemet ligger i korngrænserne. Der, hvor to korn er smeltet sammen under sintringen, skabes generelt kun et "svagt led" med stærkt reducerede strømbærende egenskaber sammenlignet med den kritiske strøm i et enkelt krystalkorn. Forsøg i Amerika har vist, at orienteringen af krystalkornene her spiller en afgørende rolle. Hvis to korn, der er orienteret ens (eller næsten ens) i forhold til hinanden, sintres sammen, vil korngrænsen kunne bære en høj strøm. Til gengæld fås meget dårlige strømbærende egenskaber for sammensintrede korn med forskellige orinteringer. Hemmeligheden er altså, at få krystalkornene orienteret i forhold til hinanden, enten mens tråden formgives (trækning og valsning eller smedning) eller under varmebehandlingen. Der bruges derfor megen tid på at studere processer, der kan formidle en sådan orientering. Foreløbig er det ikke lykkedes at udvikle nogen tilstrækkelig effektiv orienteringsteknik i Danmark, men et enkelt firma i Japan, Sumitomo Electric Industries, og et konsortium med det italienske Pirelli i spidsen har hver for sig offentliggjort resultater med kritiske strømtætheder op til 40.000 A/cm^2, så der er stadig mulighed for, at de keramiske superledere har en fremtid indenfor højstrømsanvendelser.

Fysik gruppen.

Indenfor fysik gruppen har en lang række karakteriseringsopgaver været løst, såsom måling af elektriske modstandskurver, susceptibilitet, magnetisering, krystalstruktur og orientering (textur), elektron mikroskopering (SEM, TEM), grundstofanalyse (EDX), mikrobølgetab osv. På grund af den meget brede sammensætning af deltagere i rammeprogrammet har eksperimentel ekspertise været til rådighed på næsten alle områder.

Det er samtidig i fysik gruppen, de mest grundforskningsprægede aktiviteter er foregået. Det gælder f.eks. teoretisk arbejde med en mikroskopisk teori om elektronstrukturen i de nye materialer baseret på den såkaldte *Resonating Valence Bond* (RVB) model. Herom kan der læses i Per Hedegårds artikel andetsteds i dette nummer af KVANT. Iøvrigt er der på NORDITA foretaget meget omfattende computer simuleringer af flux liniers opførsel i to dimensionelle flux gitre. Der er her opdaget nye sammenhænge mellem flux gitterets elastiske egenskaber og urenheder i materialet.

Af grundlæggende eksperimentelt arbejde kan nævnes studier udført på RISØ af reaktionskinetikken samt bestemmelse af fase diagrammet og reaktionshastighederne i $YBa_2Cu_3O_{6+x}$. Her har også de antiferromagnetiske korrelationer i samme materiale været studeret i samarbejde med udenlandske forskere.

Film gruppen.

Det er indenfor tyndfilmsarbejdet, at nogle af de mest bemærkelsesværdige resultater er opnået. Det drejer sig om fremstilling af krystallinske (epitaxielle) tyndfilm af $YBa_2Cu_3O_7$ med kritiske strømtætheder omkring 10^7 A/cm^2 målt ved 77 Kelvin. Filmene fremstilles på NKT med en ny teknik kaldet laser forstøvning, og resultaterne ligger på linie med de allerbedste i verden. Der er således i Danmark mulighed for at være med i en tidlig teknologisk udnyttelse af de keramiske superledere baseret på disse film. NKT's tyndfilmsarbejde er beskrevet i en selvstændig artikel, og konkrete anvendelsesmuligheder er behandlet i Jørn Bindslev Hansens artikel her i bladet.

Det øvrige tyndfilmsarbejde har hovedsageligt omfattet karakterisering af NKT-filmene samt udvikling af velegnede litografiske processer og andre metoder til dannelse af de basiselementer, der er nødvendige for udvikling af egentlige tyndfilmskomponenter. Det drejer sig bl.a. om superledende baner, multilag, mikrostrips, superledende kryds og Josephson mikrobroer. Et eksempel på en Josephson mikrobro er fremstillet på HCØ med ion-bestråling af en indsnævring i en superledende bane.

Hvad kom der så ud af evalueringen ?

Et fortsat nationalt program for høj-temperatur superledning må være baseret dels på den internationale udvikling og dels på de resultater og den ekspertise, der er opnået i de første tre år. Arbejdet i denne periode har været evalueret af et internationalt panel nedsat af forskningsrådene, og evalueringsrapporten er netop afleveret.

Rapporten er opbygget, så hvert deltagende laboratorium er evalueret separat, og der er til slut afsnit, der evaluerer samarbejde og koordination samt de teknologiske perspektiver. Evalueringen er gennemgående positiv og fremhæver mange solide indsatser, der har præget det meste af arbejdet.

Graden af koordination i projektet har været passende i forhold til den måde, hvorpå styregruppen har valgt at organisere arbejdet. Organisationen har været baseret på afholdelse af fælles- og emnemøder, fordeling af fællesudgifter samt årlige forhandlinger om budgettet. En mere diktatorisk ledelse ville selvfølgelig have kunnet fremme koordinationen.

Programmet skønnes at have vigtige teknologiske elementer for tyndfilmsanvendelser og på komponent området. Arbejdet med materialeudvikling og tråde er også lovende, især hvis det kan fokuseres mere præsist samtidigt med, at det akademiske engagement øges indenfor dette område.

Ialt konkluderes det derfor, at det for Danmark er værdifuldt af *fortsætte* et nationalt program indenfor høj temperatur superledere. Det vurderes, at programmet kunne beskæres med op til 30%, hvis man til gengæld kun satser på et snævrere område, f.eks. udviklingen af tyndfilm. Programmet kunne dog med megen fordel fortsætte på det nuværende niveau eller højere, og derved stadig omfatte udvikling af bulk anvendelser.