

Kohtion hiukkaskoon vaikutus korkean lämpötilan
suprajohteesta valmistetun ohutkalvon
ominaisuuksiin

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2023
Samuel Mejia
Tarkastaja:
Prof. Petriina Paturi

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

MEJIA, SAMUEL Kohtion hiukkaskoon vaikutus korkean lämpötilan suprajohteesta valmistetun ohutkalvon ominaisuuksiin

LuK-tutkielma, 16 s., 3 liites.

Fysiikka

Toukokuu 2023

Tutkielmassa tutustutaan suprajohteiden perusominaisuuksiin kuten nolla-resistanssiin, Meissnerin ilmiöön sekä yleisimpiin suureisiin ja ilmiöihin joihin keskittyy suprajohtetutkimuksessa. Lisäksi esitetään kaksi erilaista valmistusmenetelmää korkean lämpötilan suprajohteelle $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ (YBCO). Nämä valmistusmenetelmät ovat nimeltään sooli-geeli sekä solid-state -menetelmä. Tutkielman pääpaino on siinä kuinka eri menetelmien aiheuttamat kokoerot kohtioissa ja ohutkalvoissa vaikuttavat YBCO:n ominaisuuksiin kuten kriittiseen virtatiheyteen ja kriittiseen lämpötilaan.

Asiasanat: Suprajohte, YBCO, hiukkaskoko, sooli-geeli, solid-state

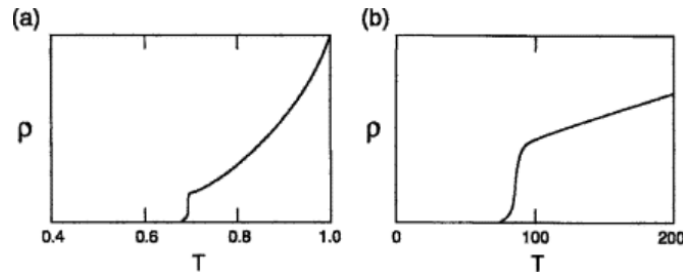
Sisällys

Johdanto	1
1 Suprajohteet	2
1.1 Resistanssi	2
1.2 Meissnerin ilmiö	3
1.3 Kriittinen lämpötila, magneettikenttä sekä virtatiheys	3
1.4 I ja II tyypin suprajohteet	4
1.5 Magneettivuon lukkiutuminen	5
1.6 YBCO	6
2 Suprajohteiden valmistusmenetelmiä	7
2.1 Solid-state -menetelmä	7
2.2 Sooli-geeli -menetelmä	7
3 Nano- ja mikrorakenteiden vertailua	9
3.1 Kidekoon vaikutus laserhöyrystykseen	9
3.2 Vaikutus kriittiseen virtatiheyteen	11
3.3 Vaikutus kriittiseen lämpötilaan	12
3.4 Vaikutus sopeutumiskenttään	13
4 Doupatut suprajohteet	14
5 Yhteenveto	15

Johdanto

Hollantilainen fyysikko H. Kamerlingh Onnes havaitsi ensimmäisenä suprajohtavuusilmiön vuonna 1911. Hän pyrki selvittämään kuinka matalaksi elohopean resistanssi voisi laskea, kun sitä jäähdytettiin nestemäisellä heliumilla, mutta huomasi että noin 4 K lämpötilassa resistanssi katosi kokonaan [1, s.1]. Siitä lähtien suprajohteita on pyritty optimoimaan esimerkiksi erilaisilla valmistusmenetelmillä, jotta niillä olisi mahdollisimman useita eri sovelluskohteita teknologiateollisuudessa sekä tutkimuksessa. Suprajohteiden käyttöön liittyy useita hankaluuksia, esimerkiksi suprajohtavuustilan ylläpitäminen ei ole kovinkaan yksinkertaista. Näiden ongelmien minimointi on suprajohdetutkimuksen päätehtävä. Näistä hankaluuksista huolimatta suprajohteita hyödynnetään sekä tutkimuksessa että teollisuudessa esimerkiksi NASA:lla ja Googlella [2, s.1].

Tässä tekstissä tutustutaan suprajohteisiin sekä yleisimpiin menetelmiin, joilla niitä valmistetaan. Lisäksi käydään läpi näiden menetelmien aiheuttamia eroja suprajohdemateriaaleihin.



Kuva 1. Havainnollistus siitä kuinka resistiivisyys tippuu nolnaan transitiolämpötilassa T_c matalan lämpötilan suprajohteelle a sekä korkean lämpötilan suprajohteelle b [3, s.27].

1 Suprajohteet

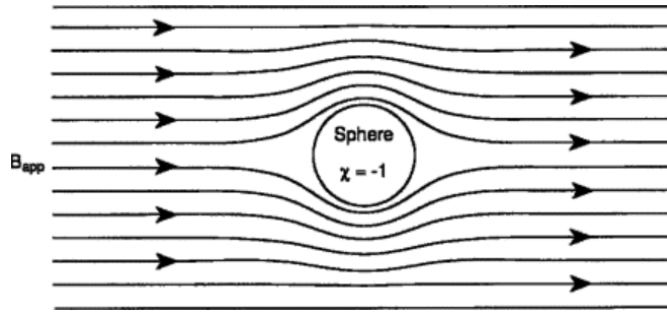
Jotta materiaali luokiteltaisiin suprajohteeksi, on sen täytettävä kaksi niille kaikille yhteistä ominaisuutta. Suprajohteilla on kuitenkin myös muita ominaisuuksia, joista ollaan kiinnostuneita.

1.1 Resistanssi

Tietystä materiaalista tehdyn kappaleen resistanssi voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (1)$$

missä R on kappaleen resistanssi, ρ on materiaalin resistiivisyys, l on kappaleen virran kulkusuunnan mukainen pituus ja S on kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala [1, s.4]. Suprajohtavan materiaalin saavuttaessa suprajohtavan tilan käy kuten kuvassa 1 on esitetty eli resistiivisyys laskee nolnaan. Näin ollen myös kyseisen kappaleen resistanssi laskee nolnaan. Tämä on suprajohteiden ominaisuuksista yleisemmin tunnettu. Johtimet, joiden resistanssi olisi nolla, olisivat hyvin hyödyllisiä esimerkiksi sähkön siirrossa, sillä tällöin johtimet eivät muuttaisi ollenkaan energiaa hukkalämmöksi.



Kuva 2. Havainnollistava kuva siitä kuinka magneettikentän kenttäviivat käyttäytyvät suprajohteen läheisyydessä [3, s.41].

1.2 Meissnerin ilmiö

Vuonna 1933 W. Meissner sekä R. Ochsenfeld havaitsivat, ettei suprajohteiden resistanssin puute ollut niiden ainoa ominaisuus. He havaitsivat, että ulkoinen magneettikenttä ei läpäise suprajohtavaa kappaletta. Tätä ilmiötä kutsutaan Meissnerin ilmiöksi ja sitä on havainnollistettu kuvassa 2. Kyseinen ilmiö perustuu siihen että suprajohteessa kulkee virtoja, jotka pakottavat magneettikentän ulos kappaleesta. [1, s.9]

1.3 Kriittinen lämpötila, magneettikenttä sekä virtatiheys

Suprajohtavat materiaalit eivät ole huoneenlämpötilassa suprajohtavia. Olosuhteiden on oltava tietynlaiset, jotta ne saavuttavat suprajohtavan tilan.

Kriittinen lämpötila (engl. critical temperature) T_c kuvastaa lämpötilaa, jonka alapuolella materiaali on suprajohtavassa tilassa ja yläpuolella normaalissa tilassa. Tämän perusteella suprajohteet jaetaan matalan lämpötilan suprajohteisiin ja korkean lämpötilan suprajohteisiin. Matalan lämpötilan suprajohteiden kriittiset lämpötilat ovat muutaman kelvinin luokkaa, joten niiden jäädyttämiseen vaaditaan nestemäistä heliumia. Korkean lämpötilan suprajohteiden kriittiset lämpötilat ovat useiden kymmenien kelviniin luokkaa, jolloin ne on mahdollista jäädyttää nestemäisellä tyypellä, jos niiden kriittinen lämpötila on yli 77 K, mikä on nestemäisen typen

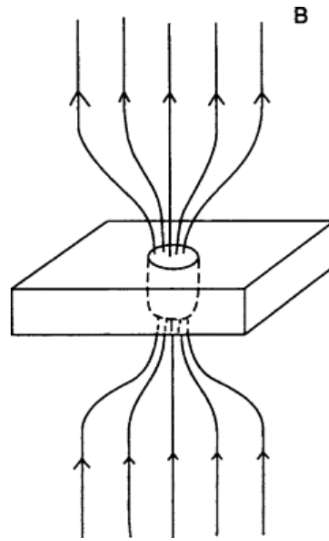
lämpötila. Tämä helpottaa huomattavasti jäädyttämistä, sillä nestemäistä tyyppiä saa suoraan ilmasta. [2]

Magneettikentän pakottaminen ulos suprajohteesta vaatii kappaleelta energiaa. Tämä energia riippuu kappaleen sisällä olevan magneettikentän energiasta eli sen voimakkuudesta. Jos magneettikenttä ylittää kriittisen arvon (engl. critical magnetic field) H_c , tällöin kappale ei saa magneettikenttää poistumaan sisältään ja näin ollen se ei päädy suprajohtavaan tilaan. [1, s.27]

Kriittinen magneettikenttä voi ylittyä, jos suprajohtavassa kappaleessa kulkevat virrat indusoivat tarpeeksi voimakkaan magneettikentän. Näin ollen on olemassa myös kriittisen virran arvo, jonka ylittäminen estää suprajohtavaan tilaan päätyksen. Koska kriittisen virran arvo riippuu myös kappaleen koosta, puhutaan yleensä kriittisestä virtatiheydestä (engl. critical current density) J_c , joka kertoo kappaleen läpi kulkeneen virran suuruuden pinta-alayksikköä kohti. [1, s.30]

1.4 I ja II tyyppin suprajohteet

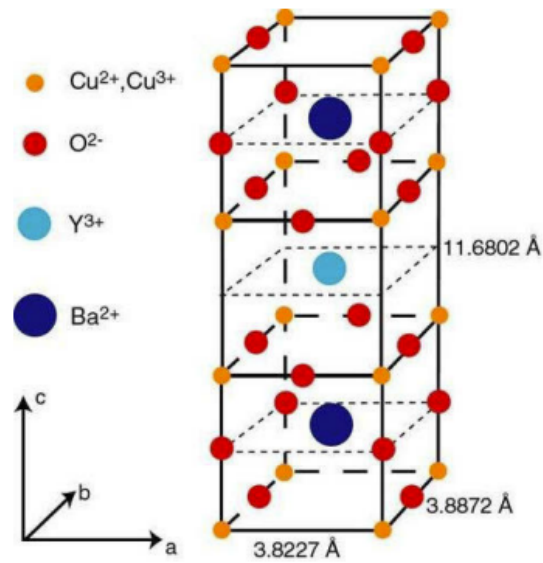
Suprajohteita on kahta eri tyyppiä, joita nimitetään tyyppi I:ksi ja II:ksi. Tyypin I suprajohteet ovat puhtaita alkuaineita ja tyypin II suprajohteet ovat seoksia tai keraamisia aineita. Tyypin I kriittiset magneettikentät ovat alle 1 T luokkaa toisin kuin tyypin II, jotka voivat olla jopa yli 100 T luokkaa [2, s.3]. Näiden kahden tyypin välinen ero on se, kuinka ne reagoivat ulkoiseen magneettikenttään. Tyypin I suprajohteet pystyvät pitämään magneettikentän kokonaan ulkopuolella, kunnes saavutetaan kriittisen kentän arvo. Tyypin II suprajohteissa vain hyvin heikko magneettikenttä pysyy ulkona. Magneettikentän voimakkuuden kasvaessa osa kentästä päätyy suprajohteen sisälle, vaikka kappale on yhä suprajohtavassa tilassa. Tällöin magneettikenttä synnyttää kappaleen sisälle vortekseja (engl. vortex). Magneettikentän voimakkuuden kasvaessa vielä suuremmaksi saavutetaan kriittinen arvo, jolloin siirrytään normaaliin tilaan [1, s.37].



Kuva 3. Havainnollistus siitä kuinka ulkoinen magneettikenttä käyttäytyy tyypin II suprajohteen läheisyydessä, kun siihen on kehittynyt vortekseja [3, s.347].

1.5 Magneettivuon lukkiutuminen

Ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta vortekseja syntyy siis vain suprajohteisiin, jotka päästävät osan magneettikentästä lävitseen. Vorteksit ovat siis pelkästään tyypin II suprajohteiden ominaisuus. Kuvassa 3 on esitetty kuinka ulkoinen magneettikenttä käyttäytyy tällöin suprajohteen läheisyydessä. Tavallisesti nämä vorteksit voivat liikkua suprajohteessa vuorovaikuttaen muiden vorteksien kanssa. Suprajohteen kautta ohjattu virta vuorovaikuttaa vorteksien kanssa liikuttaen niitä. Vorteksien liike aiheuttaa siis kitkaa, joka puolestaan kuluttaa energiaa. Tämä ilmenee resistanssina. Tyypin II suprajohteen kriittisen virtatiheyden määrää siis vorteksien kyky liikkua. Kun kyseiset vorteksit ovat lukittuina, ei suprajohteessa ilmene resistanssia [1, s.41]. Lukkiutumiskeskuksia (engl. pinning centres) saadaan luotua suprajohteisiin rakenteellisilla virheillä (engl. defects) sekä lisäämällä ei-suprajohtavia epäpuhtauksia suprajohteen rakenteeseen [2].



Kuva 4. YBCO:n rakennekuva [2].

1.6 YBCO

Yksi esimerkki tyypin II korkean lämpötilan suprajohteesta on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ (YBCO). YBCO löydettiin vuonna 1987 ja se on ensimmäinen korkean lämpötilan suprajohde, joka toimii nestemäisen tyypin alueella. Sen kriittinen lämpötila on 92 K. YBCO:n rakenne on esitetty kuvassa 4. Keraamisen rakeenteensa takia YBCO:sta valmistetaan ohutkalvoja laserhöyrystyksellä, jotta niitä pystyy hyödyntämään sovelluksissa. YBCO soveltuu tulevaisuuden sähkötekniikan komponentiksi, minkä takia monet tutkimukset keskittyvätkin sen ominaisuuksien optimoimiseen. Näitä tapoja ovat esimerkiksi hiukkaskoon pienentäminen sekä epäpuhtauksien lisääminen YBCO:n rakenteeseen. YBCO:n rakenne on hyvin riippuvainen happiatomien määrästä. Jos yhdisteen happipitoisuus on vähemmän kuin 6.4 happiatomia yhtä YBCO-molekyyliä kohti, menettää yhdiste suprajohtavat ominaisuutensa. [2]

2 Suprajohteiden valmistusmenetelmiä

Suprajohteita, esimerkiksi YBCO:a, voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä. Näillä menetelmillä on jokaisella omat hyvät ja huonot puolensa.

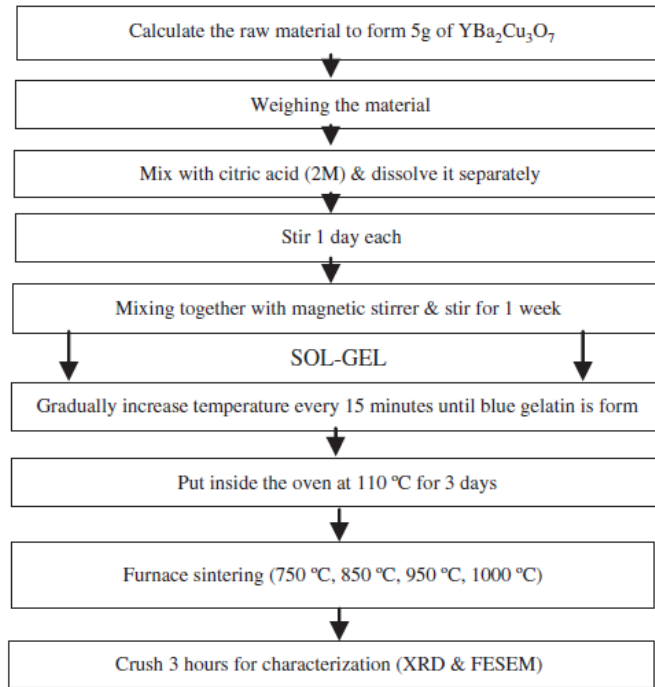
2.1 Solid-state -menetelmä

Solid-state -menetelmä tai keraaminen menetelmä (engl. ceramic method) on yleisin tapa valmistaa suprajohteita, joiden lähtötuotteet ovat kiinteitä aineita kuten esimerkiksi YBCO:ssa. Prosessin lähtöaineet ovat siis jonkinlaisia metallioksidea, karbonaatteja tai joitain muita suoloja. Menetelmä perustuu siihen, että ensin kyseisiä lähtöaineita mitataan oikeat stoikiometriset määrät ja nämä sekoitetaan keskenään. Tämän jälkeen syntynyttä jauhetta murskataan ja sekoitetaan pyrkimyksenä saada aikaiseksi mahdollisimman homogeeninen jauhe. Tämän jälkeen kyseinen jauhe kuumennetaan uunissa, jonka lämpötilat voivat olla jopa 2300 K. Jauheen valmistuttua siitä voidaan puristaa suprajohdekohtio, josta voidaan sitten valmistaa esimerkiksi suprajohdekalvoja laserhöyrystyksellä (engl. pulsed laser deposition PLD). [4]

Solid-state -menetelmä on yleisin tapa valmistaa edellä mainittuja suprajohteita, koska menetelmä on yksinkertainen ja suhteellisen nopea toteuttaa. Kyseisen menetelmän huonoihin puoliin kuuluvat esimerkiksi se, että lähtöaineet ovat atomitasolla epähomogeenisiä eikä sekoittamalla jauheita saada luotua atomitasolla homogeenista lopputuotetta. Näin ollen kohtion rakenteessa voi olla suuriakin eroja [4]. Korkeat lämpötilat kasvattavat myös kohtion hiukkaskokoa termisen agglomeraation vaikutuksesta (engl. thermal agglomeration) [5].

2.2 Sooli-geeli -menetelmä

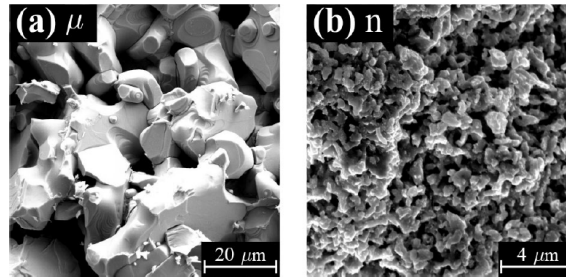
Solid-state -menetelmällä valmistettujen jauheiden hiukkaskoko on tavallisesti mikrometrin luokkaa. Hiukkaskoko selittyy edellä mainitun korkean lämpötilan perus-



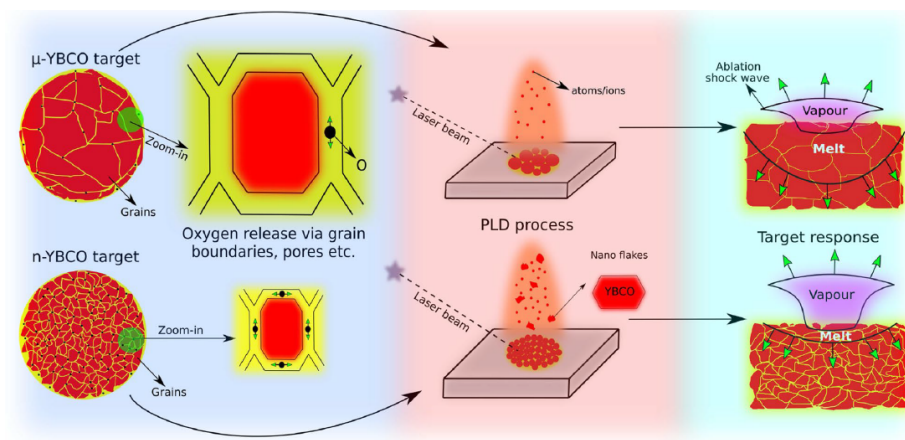
Kuva 5. Esimerkki sooli-geeli prosessista YBCO:n valmistusta varten [6]

teella sekä siitä että koko prosessin aikana käsitellään jauheita, joilla on jo suuri hiukkaskoko. [5]

Hiukkaskoon pienentämiseksi on kehitetty sooli-geeli -menetelmä (engl. sol-gel method). Sen pyrkimys on saada sekoitettua metalli-ionit atomitasolla mahdollisimman alhaisilla lämpötiloilla mahdollistaen pienemmän hiukkaskoon. Menetelmän runko on esitetty kuvassa 5. Menetelmä perustuu siis siihen, että oikeissa suhteissa esimerkiksi metallinitraateista muodostetaan liuokset, jotka sekoitetaan keskenään. Tähän liuokseen lisätään sitruunahappoa ja sekoitetaan hyvin. Tällöin on saatu muodostettua hyvin homogeeninen liuos, jossa metalli-ionit ovat sekaisin atomitasolla. Liuosta kuumentamalla saadaan ylimääräiset nesteet pois, jolloin muodostuu geeli. Geeli poltetaan jauheeksi, jolloin siitä on saatu kaikki ylimääräiset yhdisteet pois. Muodostunutta jauhetta kuumennetaan uunissa happikäsittelyn kanssa selvästi pienemmillä lämpötiloilla kuin solid-state -menetelmässä. Näin on saatu valmistettua jauhe, josta voidaan jälleen muodostaa suprajohdekohtio, mutta tällä kertaa



Kuva 6. Elektronimikroskoopilla (engl. Scanning Electron Microscope SEM) otetut kuvat μ - ja n-YBCO kohtioiden pinnoista [7].



Kuva 7. Havainnollistus siitä kuinka eri prosesseilla valmistetut kohtiot käyttäytyvät eri tavalla laserhöyrystyksessä. [7].

alkuaineet ovat sekoittuneet keskenään atomitasolla. [4]

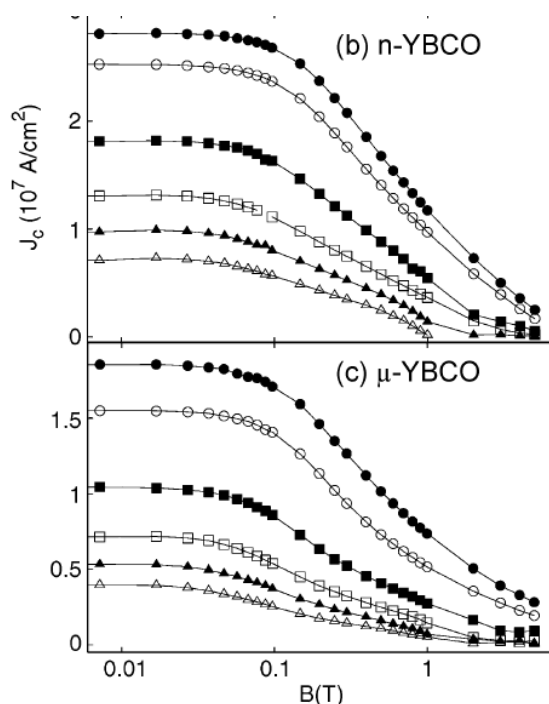
3 Nano- ja mikrorakenteiden vertailua

3.1 Kidekoon vaikutus laserhöyrystykseen

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, erilaisilla menetelmillä saadaan muodostettua suprajohdekohtioita, joilla on erilaiset hiukkaskoot. Tämä johtui pääosin prosesseissa käytetyistä eri maksimilämpötiloista. Kuvassa 6 on esitetty elektronimikroskoopilla otetuissa kuvissa kuinka erilaista kokoluokkaa ovat solid-state -menetelmällä valmistetun μ -YBCO:n ja sooli-geeli -menetelmällä valmistetun n-YBCO:n hiukkas-

koot. Kuvasta voidaan todeta, että μ -YBCO:n hiukkaskoot ovat 5–20 μm luokkaa ja vastaavasti n-YBCO:lla 100–500 nm luokkaa. Saman massaisten kohtioiden kiderakenteet ovat siis aivan erilaiset, jos ne on tuotettu käyttäen näitä eri menetelmiä. Koska kokoluokat ovat noin erilaiset, on tutkittu onko näillä eri prosesseilla valmistetuilla suprajohteilla eroja myös ominaisuuksissa. [7]

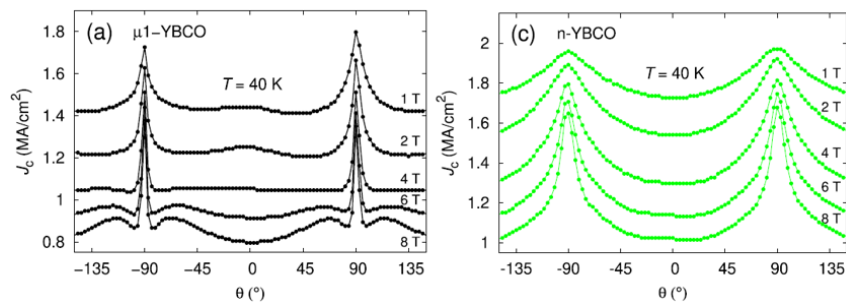
On huomattu, että suprajohdekalvojen valmistuksessa kalvojen lopulliset rakenteet ovat erilaiset käytettäessä kalvon valmistuksessa laserhöyrystystä. Rakenteelliset erot voidaan selittää kohtioiden erilaisilla hiukkasrakenteilla [7]. Laserhöyrystyksessä laserilla irroitetaan kohtion pinnasta hiukkasia, jotka etenevät pilven (engl. plume) muodossa kasvatusalustalle (engl. substrate) [2]. Kuten kuvassa 7 on esitetty μ -YBCO:n tapauksessa pilvi koostuu yksittäisistä atomeista ja ioneista, mutta n-YBCO:n tapauksessa pilvi koostuu erikokoisista hiukkasista, joista isoimmat ovat YBCO nanopartikkeleita. n-YBCO:n tapauksessa kalvolle syntyy siis enemmän rajapintoja (engl. grain boundaries) sekä kiderakenteen virheitä. Edellä on jo todettu, että nämä ovat asioita, joita voidaan haluta muodostaa suprajohteisiin sillä ne toimivat lukkiutumiskeskuksina ja parantavat tällöin esimerkiksi kriittistä virtatiheyttä [7].



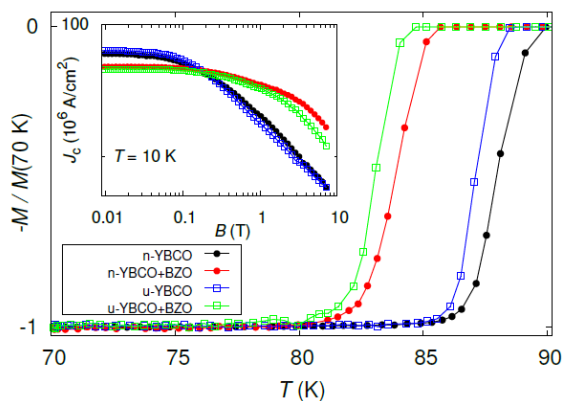
Kuva 8. μ - ja n -YBCO kalvojen kriittisen virtatiheyden riippuvuus magneettikentästä eri lämpötiloilla. Lämpötilat ovat 5 K, 10 K, 20 K, 30 K, 40 K sekä 50 K ylhäältä alaspäin [10].

3.2 Vaikutus kriittiseen virtatiheyteen

Kriittinen virtatiheys kertoo kuinka paljon virtaa suprajohde pystyy kuljettamaan pinta-ala yksikköä kohti. Näin ollen on järkevää, että tätä ominaisuutta pyrittiin maksimoimaan, jotta suprajohde pystyisi kuljettamaan mahdollisimman paljon virtaa kerralla. Korkean lämpötilan suprajohdeissa kriittinen virtatiheys määräytyy magneettivuon lukkiutumisen voimakkuuden perusteella [8]. Toisin sanoen sen arvo määräytyy kalvoon muodostuneiden virheiden perusteella [9]. Kuvassa 8 on esitetty kuinka eri kohtioista valmistettujen kalvojen kriittiset virtatiheydet muuttuvat magneettikentän funktiona eri lämpötilan arvoilla. Kuvasta nähdään selvästi, että n -YBCO:lla on korkeampi kriittinen virtatiheys verrattuna μ -YBCO:n arvoihin. Lisäksi magneettikentän voimakkuuden kasvaessa n -YBCO:n arvot laskevat maltillisemmin, joka viittaisi siihen että kyseisellä tavalla valmistettu kalvo sopisi paremmin



Kuva 9. Kriittisen virtatiheyden kulmariippuvuus μ - ja n-YBCO:lle eri magneettikentän arvoilla [7].



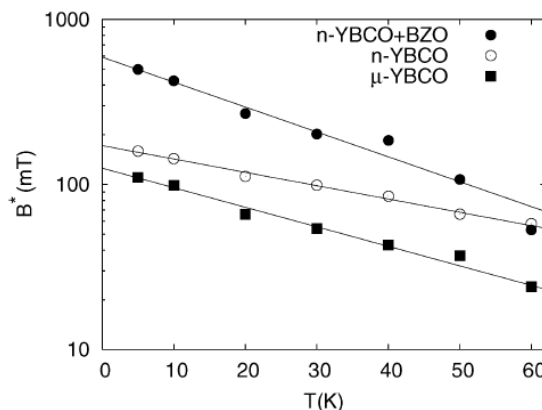
Kuva 10. Normalisoidut magnetisaatiot lämpötilan funktiona sekä kriittinen virtatiheys magneettikentän funktiona puhtaille μ - ja n-YBCO:lle sekä doupatuille [11].

myös sovelluksiin, joissa hyödynnetään voimakkaita magneettikenttiä [10].

Kuvassa 9 on esitetty kuinka kalvojen kriittiset virtatiheydet muuttuvat kierto- kulman funktiona. Tästä nähdään että n-YBCO:lla kriittinen virtatiheys ei ole yhtä kulmariippuvainen kuin μ -YBCO:lla [7]. Tämä johtuu siitä ettei n-YBCO:n rakenne ole yhtä yhtenäinen erilaisten kidevirheiden takia, jolloin vortekseja lukittuu myös suunnissa, joissa niitä ei lukkiudu μ -YBCO:n tapauksessa [9].

3.3 Vaikutus kriittiseen lämpötilaan

Kriittinen lämpötila on yksi suprajohteen ominaisuuksista, jota on järkevää optimoida. Mitä korkeampi on kriittinen lämpötila, sitä vähemmän on nähtävä vaivaa



Kuva 11. Sopeutumiskentän riippuvuus lämpötilasta μ - sekä n-YBCO:lla sekä doupatulla n-YBCO:lla [10].

suprajohteen jäädyttämiseen. Kuvassa 10 on esitetty kuinka magnetisaation muutos tapahtuu eri lämpötiloissa eri kohtioista valmistetuilla kalvoilla sekä kuinka ne poikkeavat kalvoista, joihin on lisätty vielä muita epäpuhtauksia. Tämä transitiolämpötila, jossa magnetisaatio muuttuu 0:sta -1:ksi on kriittinen lämpötila. Huomataan että n-YBCO:n kriittinen lämpötila on noin asteen verran korkeampi kuin μ -YBCO:n. Kriittiseen lämpötilaan eri rakenteilla ei siis ole kovinkaan merkittävää eroa. Tämä selittyy sillä että molemmat näytteet ovat puhdasta YBCO:a, jolloin niiden siirtymisen pitäisi tapahtua suunnilleen samassa lämpötilassa. [11]

3.4 Vaikutus sopeutumiskenttään

Viimeisenä ominaisuutena tarkastellaan suprajohteen sopeutumiskenttää (engl. accommodation field) B^* . Sopeutumiskenttä kertoo sen magneettikentän voimakkuuden arvon, jolla suorajohteen kriittinen virtatiheys on laskenut selvästi kentättömän suprajohteen kriittisestä virtatiheydestä. Samalla tavalla kuin kriittisen virtatiheydenkin arvo myös sopeutumiskentän arvo riippuu kalvossa olevien virheiden määrästä. Kuvassa 11 on esitetty kuinka eri kalvoilla sopeutumiskenttä muuttuu lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että sopeutumiskenttä on suurempi n-YBCO:lla kuin μ -YBCO:lla. Tämä johtuu juuri siitä että n-YBCO:n rakenteessa on enemmän vor-

teksejä lukitsevia virheitä, jolloin vaaditaan korkeampi magneettikenttä kriittisen virtatiheyden laskemiseen. [9]

4 Doupatut suprajohteet

Kuten kuvasta 10 näkyi, epäpuhtauksien lisääminen YBCO:n rakenteeseen laskee YBCO:n kriittistä lämpötilaa, mutta samalla kriittinen virtatiheys ei laske yhtä voimakkaasti korkeassa magneettikentässä. Tämä perustuu siihen, että tuomalla suprajohteen rakenteeseen lisää epäpuhtauksia, esimerkiksi tässä tapauksessa BaZrO₃:sta (BZO), kasvatetaan lukkiutumiskeskusten määrää. Tämä epäpuhtauksien lisääminen aiheuttaa kuitenkin sen, ettei suprajohteen hilarakenne koostu enää pelkästään suprajohteesta, jolloin sen kriittinen lämpötila laskee. Epäpuhtauksien lisääminen kasvattaa siis suprajohteen sovelluskohteita vielä korkeampiin magneettikenttiin. Kriittisen lämpötilan laskeminen ei välttämättä ole kovinkaan suuri menetys, sillä kyseiset lämpötilat ovat yhä 77 K yläpuolella, mikä oli nestemäisen typen lämpötila. [11]

Kuvasta 11 nähtiin myös se, että sopeutumiskenttä on paljon suurempi doupatulla kalvolla kuin muilla. Tämä tietenkin käy järkeen, sillä epäpuhtauksien kasvattaminen kasvattaa lukkiutumiskeskusten lukumäärää. Kuvaaajasta kuintekin huomataan se, että sopeutumiskenttä myös laskee voimakkaammin doupatulla kalvolla. Tämä johtuu siitä, että lämpötilan kasvaessa doupattu kalvo menettää suprajohtavat ominaisuutensa nopeammin kuin puhtaasta YBCO:sta valmistetut kalvot sillä sen kriittinen lämpötila on matalampi. [10]

5 Yhteenveto

Suprajohteiden yleistymisen mahdollistaisi teknologiateollisuuden, niiden sähköjohtokyvyn sekä magneettikenttien voimakkuuksien avulla. Niiden ongelmina on kuitenkin useat olosuhteiden kriteerit, joiden on täytyttävä, jotta suprajohteita voidaan hyödyntää. Tästä johtuen suprajohteita tutkitaan ja pyritään löytämään erilaisia suprajohteita, jotka toimisivat eri olosuhteissa. Suprajohteiden ominaisuuksiin vaikuttavat materiaalit, valmistusmenetelmät sekä pienet muutokset rakenteessa, joten tutkimukset keskittyvät näihin alueisiin.

Tässä tekstissä tutustuttiin suprajohteisiin, niiden valmistusmenetelmiin sekä siihen kuinka eri valmistusmenetelmät vaikuttivat YBCO:n fysikaalisiin ominaisuuksiin. Eli käytiin läpi syitä miksi suprajohteita valmistaessa pitää olla kiinnostunut tavasta, jolla se valmistetaan.

Viitteet

- [1] V.L. Ginzburg, E.A. Andryushin, *Superconductivity*, 2004
- [2] M. Z. Khan, *YBCO superconductor on buffered metallic tapes for coated conductor based applications*, (2021)
- [3] C. Poole Jr., H. Farach, R. Creswick, R. Prozorov, *Superconductivity 2e*, 2007
- [4] C. N. R. Rao, R. Nagarajan, R. Vijayaraghavan, *Synthesis of cuprate superconductors*, Supercond. Sci. Technol. **6**, 1–22 (1993)
- [5] J. Raittila, H. Huhtinen, P. Paturi, Y. P. Stepanov, *Preparation of superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ nanopowder by deoxydation in Ar before final oxygenation*, Physica C **371**, 90–96 (2002)
- [6] N. Yahya, MH. Zakariah, *Synthesis and characterization of $YBa_2Cu_3O_7$ (Y123) via sol-gel method for development of superconducting quantum interference device magnetometer*, J Nanosci Nanotechnol. (2012)
- [7] M. M. Aye, E. Rivasto, M. Z. Khan, H. Rijckaert, E. Salojärvi, C. Haalisto, E. Mäkilä, H. Palonen, H. Huhtinen, I. Van Driessche, P. Paturi, *Control of the nanosized defect network in superconducting thin films by target grain size*, G659 Sci. Rep. **11**, 6010:1–11 (2021)
- [8] M. Peurla, H. Huhtinen, P. Paturi, *Magnetic relaxation and flux pinning in YBCO films prepared by PLD from a nanocrystalline target* Supercond. Sci. Technol., **18**, 628–633 (2005)
- [9] M. Peurla, H. Huhtinen, Y. Y. Tse, J. Raittila, P. Paturi, *Structural properties of YBCO thin films deposited from different kinds of targets*, IEEE T. Appl. Supercond. **17**, 3608–3611 (2007)
- [10] H. Huhtinen, M. Peurla, M. A. Shakhov, Yu. P. Stepanov, P. Paturi, J. Raittila, R. Palai, R. Laiho, *Superconducting Properties of Films Deposited From Micro-, Nanocrystalline and Optimally BZO-Doped YBCO Targets*, IEEE T. Appl. Supercond. **17**, 3620 (2007)
- [11] M. Z. Khan, E. Rivasto, J. Tikkanen, H. Rijckaert, M. Malmivirta, M. O. Liedke, M. Butterling, A. Wagner, H. Huhtinen, I. Van Driessche, P. Paturi, *Supplementary Information: Enhanced flux pinning isotropy by tuned nanosized defect network in superconducting $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ films*, 2019