

Quenchit korkean ja matalan lämpötilan suprajohteissa

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Fil. yo. Sonja Turpeinen
Tarkastaja:
Prof. Petriina Paturi

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Turpeinen, Sonja Quenchit korkean ja matalan lämpötilan suprajohteissa

LuK-tutkielma, 21 s., 3 liites.

Fysiikka

Helmikuu 2025

LuK-tutkielmassa käytiin läpi lyhyesti suprajohtavuuden perusteet, jonka jälkeen tutustutaan quenchiin ilmiönä suprajohteissa, sekä niille altistavia tekijöitä. Lopuksi esitellään kahdeksan erilaista menetelmää quenchien havaitsemiseen ja käydään läpi niiden mahdollisuuksia tulevaisuuden sovelluksiin. Tutkielma painottui enemmän korkean lämpötilan suprajohteisiin, koska niiden havaintomenetelmien tutkimus on edelleen kesken.

Asiasanat: Suprajohde, quench, havaintomenetelmä

Sisällys

Johdanto	1
1 Suprajohtavuuden perusteet	2
1.1 Resistanssi	2
1.2 Kriittinen lämpötila, magneettivuontiheys ja virtatiehys	2
1.3 I- ja II-tyyppin suprajohteet	3
2 Quenчит suprajohteissa	4
2.1 Quenचितen syntyminen	4
2.2 Altistavien tekijöiden erot korkean ja matalan lämpötilan suprajohteissa	6
3 Havaitseminen korkean lämpötilan suprajohteissa	8
3.1 Menetelmät	8
3.1.1 Jännite mittauksiin perustuvat	8
3.1.2 Hallin sensorit	9
3.1.3 Akustinen termometria	10
3.1.4 Kapasitanssia hyödyntävä	13
3.1.5 Radiotaajuuksia hyödyntävät	14
3.1.6 Fiber Bragg Grating	16
3.1.7 Ultra-long-Fiber Bragg Grating	17
3.1.8 Optinen taaajuusalueen heijastuminen	18
4 Yhteenveto	19

Johdanto

1900-luvun alkupuolella H. Kamerlingh Onnes havaitsi elohopean resistanssin laskevan nollaan alle 4,15 K lämpötilassa. Samalla hän käynnisti suprajohtavuuden tutkimusalan, joka vielä yli 100 vuotta myöhemmin on ajankohtainen [1, s. 24]. Aluksi ajateltiin suprajohteita olevan vain yhtä tyyppiä, kunnes 1950-luvulla syntyi teoria vortekseista, joka on perusta II-tyyppin suprajohteille [2, s. 4-6]. Vuonna 1986 julkaistiin artikkeli mahdollisista korkean lämpötilan suprajohteista ja seuraavana vuonna löydettiin suprajohde, jonka kriittinen lämpötila oli lähemmäs 40 K. Tämän jälkeen korkean lämpötilojen suprajohteiden kehitys kiihtyi entisestään. [1, s. 25].

Aikaisessa vaiheessa kohdattiin ongelmia suprajohteiden käytännön sovelluksissa, sillä suprajohteet menivät äkillisesti normaaliin resistiiviseen tilaan. Ilmiö sai nimen quench [3, s. 68] ja se on nykypäivänä vielä tutkimuksen kohteena. Korkean lämpötilan suprajohteilla quenchin havaitseminen on osoittautunut matalan lämpötilan suprajohteisiin verrattuna hankalimmaksi ja edelleen pyritään kehittämään entistä parempia havaintomenetelmiä. Tässä kandidaatintutkielmassa keskitytään quenchiin ilmiönä ja käydään läpi erilaisia menetelmiä niiden havaitsemiseen korkean ja matalan lämpötilan suprajohteissa.

Tekoälyä on käytetty kääntämiseen ja sanoille suomenkielisen vastineen keksimiseen.

1 Suprajohtavuuden perusteet

1.1 Resistanssi

Aineella on monta erilaista ominaisuutta ja yksi niistä on kyky vastustaa sähkövirtaa. Tätä ominaisuutta kutsutaan resistiivisyydeksi

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (1)$$

joka on kääntäen verrannollinen aineen sähkönjohtavuuteen σ . Resistiivisyys on riippuvainen aineen lämpötilasta ja sen yksikkö on Ωm . [1, s. 1-21] Resistiivisyyden avulla voidaan määrittää johteen resistanssi eli sen kyky vastustaa sähkövirtaa

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (2)$$

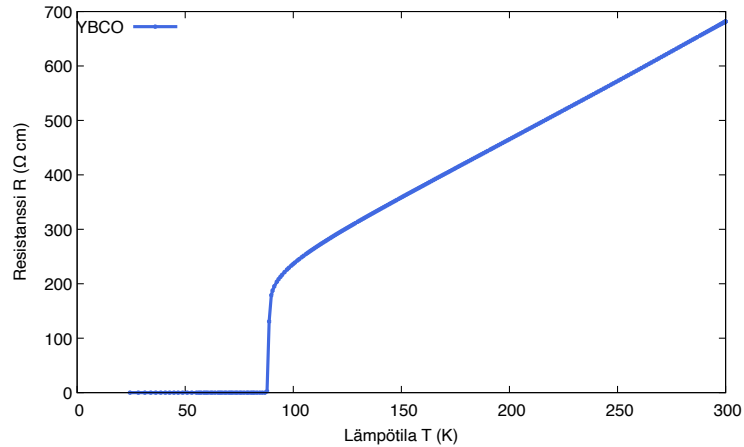
jossa L johtimen pituus ja A sen poikkipinta-ala. Johteessa kahden pisteen välinen resistanssi pystytään määrittämään mitatun jännitteen V ja syötetyn virran I välisen suhteen avulla

$$R = \frac{V}{I}. \quad (3)$$

[1, s. 23-59]

1.2 Kriittinen lämpötila, magneettivuontiheys ja virtatiehyys

Suprajohteilla on erilaisia kriittisiä arvoja, jotka vaikuttavat sen eri ominaisuuksiin. Kun päästään kriittisen lämpötilan T_c alapuolelle, suprajohteen resistanssi laskee nolnaan, eli johde muuttuu normaalijohtavasta tilasta suprajohtavaan tilaan. Turun yliopiston projektityökurssilla mitattiin YBCO-ohutkalvon resistanssin lämpötila riippuvuutta ja kuten kuvaajassa 1 näkyy, ohutkalvon resistanssi tippuu nolnaan kun lämpötila laskee T_c alapuolelle eli n. 90 K kohdalla. Muita kriittisiä arvoja ovat kriittinen magneettivuontiheys B_c , kriittinen virtatiehyys J_c ja kriittinen virta I_c . Kun johde ylittää B_c :n ja I_c :n, menettää se suprajohtavuutensa. J_c induoi



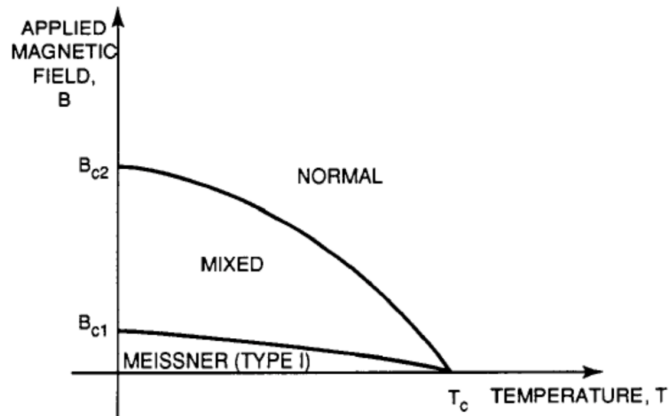
Kuva 1. Projektityön mittauksista YBCO-ohutkalvon resistanssin lämpötila riippuvuus

suprajohteen pintaan kriittisen magneettikentän H_c , joka tunkeutuu johteen sisään palauttaen sen suprajohtavasta tilasta normaalijohtavaan tilaansa. [1, s. 23-59]

1.3 I- ja II-tyypin suprajohteet

Suprajohteet luokitellaan I- ja II-tyypin suprajohteisiin, sen mukaan, miten ne vastustavat ulkoista magneettikenttää. I-tyypin suprajohteet luovat välitilan (engl. Intermediate State), joka pyrkii pitämään johteen pinnalla olevan magneettikenttän johteen ulkopuolella. Ne siis pystyvät vastustamaan ulkoista magneettikenttää. I-tyypin suprajohteita ovat kaikki muut suprajohtavat alkuaineet paitsi niobium. [1, s. 307-335]

II-tyypin suprajohteet ovat metalliseoksia, sekä erilaisia yhdisteitä. Niillä on kaksi eri kriittisen magneettivuontiheyden arvoa; alempi kriittinen magneettivuon tiheys B_{c1} ja ylempi kriittinen magneettivuon tiheys B_{c2} . Kun ulkoinen magneettikenttä ylittää B_{c1} :n arvon, johde pitää edelleen suprajohtavat ominaisuudet, mutta sen sisään muodostuu vortekseja (engl. vortex). Vorteksit ovat materiaalin normaaleja alueita suprajohteen sisällä ja niissä on loukkuun jäänyttä magneettivuota. Mitä



Kuva 2. Tyypin-II suprajohteen faasidiagrammi [2]

suurempi ulkoinen magneettivuoto on, sitä voimakkaammin se tunkeutuu johteen sisään kasvattaen vorteksien lukumäärää. Kun ulkoinen magneettikenttä ylittää B_{c2} :n, alkavat vorteksien normaalit ytimet limittyä ja materiaali menettää suprajohtavuutensa kokonaan. [1, s. 337-383]

II-tyypin suprajohteiden kyky muodostaa vortekseja auttaa niitä vastustamaan voimakkaampia ulkoisia magneettikenttiä. Faasidiagrammissa (2) voidaan nähdä B_{c1} :n ja B_{c2} :n riippuvuus lämpötilasta ja kuinka vorteksien ansiosta B_{c1} :tä suuremmissa magneettikentissä johde pysyy edelleen suprajohtavassa tilassa. Kaikki korkean lämpötilan suprajohteet (engl. high temperature superconductors) (HTS) ovat II-tyypin suprajohteita. [1, s. 337-383]

2 Quenчит suprajohteissa

2.1 Quenchien syntyminen

Suprajohde voi mennä äkillisesti suprajohtavasta tilasta aineen normaaliin resistiiviseen tilaan, eikä se enää palaudu takaisin suprajohtavaksi ennen kuin suprajohde jäähdytetään ja käynnistetään uudelleen. Tätä ilmiötä kutsutaan quenchiksi [3,

s. 68]. Joulen lain avulla on mahdollista ilmaista virtapiirin energian muuttumista lämmöksi ja Ohmin lakia hyödyntäen saadaan esitettyä virtapiirin teho

$$P = RI^2, \quad (4)$$

jolla energiaa muutetaan lämmöksi resistanssin R ja virran I avulla [4]. Suprajoh-tavassa tilassa suuret virrat eivät aiheuta energian muuttumista lämmöksi, mutta quenchin seurauksena tilanne muuttuu. Aineen normaali resistiivisyys ja korkea vir-rantiheys synnyttävät lämpöä, joka nostaa suprajohteen lämpötilan yli kriittisen pisteen. Magneeteissa quenचित vapauttavat kaiken niihin varastoituneen energian

$$U = \frac{1}{2}LI^2, \quad (5)$$

jossa L on magneetin itseinduktanssi. Quenchien syntymisen syitä ovat esimerkiksi erilaiset mekaaniset häiriöt johteessa tai pieni lämpötilan nousu. Häiriöiden synnyt-tämiä kohtia, joissa suprajohteen lämpötila on ympäristöön nähden kasvanut, kut-sutaan kuumiksi kohdiksi (engl. hot spots). Nämä ovat niitä pisteitä, jossa lämpöä alkaa muodostua. Kuumat kohdat synnyttävät normaalitilassa olevia alueita (engl. normal zone). Ylittäessä pituuden

$$l = \left\{ \frac{2k(\theta_c - \theta_0)}{J_c^2 \rho} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

jossa k on lämmönjohtavuus, θ_c kuuman kohdan lämpötila, θ_0 magneetin lämpötila, J_c kriittinen virtatiheys ja ρ normaalitilan resistiivisyys, jatkaa normaalitila kas-vua vakionopeudella, toisin sanoen tietyllä leviämisenopeudella (engl. propagation velocity). Pituuden arvoa l , jolla normaalitila alkaa leviämään, kutsutaan minimie-viämisalueeksi (MLA) (engl. minimum propagating zone (MPZ)). Pituuden ollessa pienempi kuin MLA, normaalitilan kehitys ei pysty kumoamaan jäähtytyksen vai-kutusta, joten normaalitila romahtaa ja johde palautuu suprajohtavaan tilaan.

Quench voi silti syntyä, jos $l \ll \text{MLA}$, koska tällöin lämmönjohtavuus on hal-litseva tekijä. Tilannetta kutsutaan pistehäiriöksi (engl. point disturbance), koska

kuuman kohdan synnyttämiseen tarvitaan tietyn kokoinen energiapulssi eikä häiriön koko tai energiatiheys ole yhtä olennaisia. Pienin energia, joka vaaditaan pistehäiriön syntymiseen, kutsutaan minimiquench-energiaksi (MQE).

Jos $l \gg \text{MLA}$ energiatihedellä on suurempi merkitys kuin lämmönjohtavuudella. Quench syntyy, kun energiatiheys on tarpeeksi suuri nostaakseen johteen lämpötilaa niin, että virrantiheys alkaa kasvamaan synnyttäen ohmista lämpöä. Tällaisen tilanteen häiriötä kutsutaan jakautuneiksi häiriöksi (engl. distributed disturbance). [3, s. 68-83]

2.2 Altistavien tekijöiden erot korkean ja matalan lämpötilan suprajohteissa

Erilaiset mekaaniset häiriöt altistavat suprajohteen quencheille. Yksinkertaistettuun esimerkkiin mekaanisesta häiriöstä havainnoidaan kelan yksittäisen kierroksen liikettä. Oletetaan kierroksen pysyvän paikoillaan kitkavoiman ansiosta, jonka viereiset kierrokset muodostavat [3, s. 85]. Sähkö- ja magnetismiopista tuttu Lorentzin voima on vastakkainen kitkavoimaan nähden [5]. Tarpeeksi suurella sähkövirralla Lorentzin voima voittaa kitkavoiman ja liikuttaa kelan kierrosta δ verran, kunnes pysähtyy kitkavoiman tai toiseen kierroksen törmäyksen seurauksena. Tilanteessa magneettikentän tekemä työ $BJ\delta$ (tilavuusyksikköä kohden) vapauttaa lämpöä, mikä synnyttää quenchin [3, s. 85].

Lyhytaikaisten häiriöiden ajatellaan olevan johteissa suurempi ongelma, kuin magneetin virran syötön aikana tapahtuva johteeseen kohdistuva rasituksen nousun tai laskun aiheuttama jatkuva häiriö. On havaintoja, että kaikkein voimakkain lyhytaikainen mekaaninen häiriö olisi sahalaitainen murtuminen (engl. serrated yielding). Tämän ilmiön ajatellaan olevan materiaalien mekaanista epävakautta. Sitä esiintyy matalissa lämpötiloissa monissa eri materiaaleissa ja se nähdään jännitysvenymäkäyrän jaksottaisina jyrkinä nousuina. Ilmiön syyn on ehdotettu olevan

matalien ominaislämpöjen, rasituksesta aiheutuvan lämmön ja lämpötilan myötä kimmovakioiden nopeiden muutosten yhdistelmä. Sahalaitaista murtumista esiintyy vain suurilla rasituksilla, joten monissa magneeteissa se ei ole suuri huolenaihe. On myös löydetty pienemmän rasituksen aiheuttamia lyhytaikaisia mekaanisia häiriöitä, jotka ovat johtaneet quenchin syntymiseen. [3, s. 85-89]

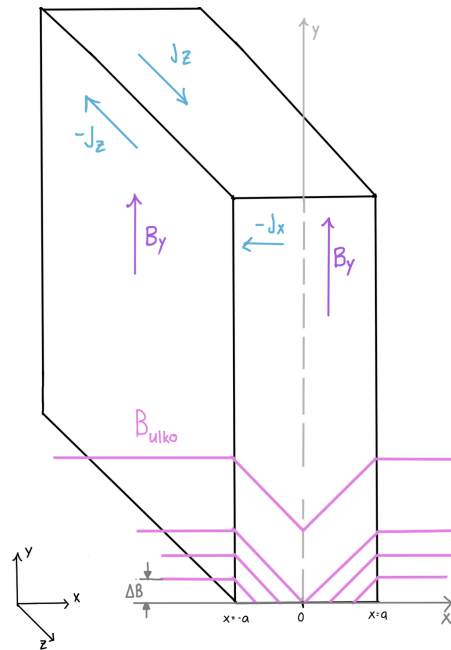
Toinen merkittävä quencheille alistava tekijä on vuon hyppiminen (engl. flux jumping). Ilmiön ymmärtämiseksi pitää ensin tietää siihen vaikuttavien tekijöiden teoriaa. Suurin vuon hyppimisen aiheuttaja on pintavirrat (engl. screening currents). Pintavirtoja voidaan verrata sähkömagneettisen induktion aiheuttamiin pyörrevirtoihin, mutta suprajohteessa resistanssin ollessa nolla ne eivät sammu. Pintavirrat indusoituvat suprajohteeseen kohtisuorassa magneettikenttään nähden, kun kenttä on suprajohtolevyn suuntainen. [3, s. 131-132]

Kuvassa 3 voidaan havaita, kuinka pintavirrat suojaavat levyä sen sisään tunkeutavalta ulkoiselta magneettikentältä B_{ulko} ja vähentävät sen voimakkuutta levyn sisällä. B_{ulko} :n kasvu ΔB saa ensin indusoidun virran kulkemaan levyllä erittäin suurella virtatiheydellä. Se aiheuttaa pintavirran heikentymisen resistiivisesti, koska indusoidun virrantiheyden on suurempi verrattuna kriittiseen virtatiheyteen J_c . Tämä taas aiheuttaa B_{ulko} :n tunkeutumisen voimakkaammin levyn sisään. Indusoidun virrantiheys alkaa laskea, kunnes se loppuu ja jää vakioksi saavutettuaan J_c :n muodostaen vakaan tilan, jossa B_{ulko} pääsee tunkeutumaan vain tiettyyn pisteeseen asti levyn sisällä. B_{ulko} kasvaa taas ΔB :n verran ja koko prosessi tapahtuu uudestaan. B_{ulko} pääsee syvemmälle levyyn ja ylitettyään tietyn arvon se pääsee tunkeutumaan siihen kokonaan. [3, s. 131-133]

Lämpötilan nousu $\Delta\theta$ aiheuttaa kriittisen virrantiheyden laskun

$$\Delta J_c = -J_c \frac{\Delta\theta}{\theta_c - \theta_0}, \quad (7)$$

jossa θ_0 on ulkoinen lämpötila ja θ_c on kriittinen lämpötila. Tämä aiheuttaa pintavir-



Kuva 3. Kaavioesitys indusoituneista pintavirroista suprajohdelevyn suuntaiseen magneettikenttään nähden ja ulkoisen magneettikentän B_{ulkko} heikentyminen levyn sisällä pintavirtojen muodostaman suojauksen seurauksena.

ran laskun, joka päästää B_{ulkko} :n syvemmälle. Magneettivuon liike synnyttää lämpöä jolloin lämpötila alkaa nousta entisestään. Tätä tapahtumaa kutsutaan vuon hyp-pimiseksi. [3, s. 132-134]

3 Havaitseminen korkean lämpötilan suprajohteis-sa

3.1 Menetelmät

3.1.1 Jännitteen mittauksiin perustuvat

Normaalitilan muodostuminen synnyttää jännitteen, ja kun kyseistä jännitettä mi-tataan ajan funktiona, saadaan selville leviämisenopeus. Kasvava jännite on siis suo-

raan verrannollinen normaalitilan leviämisenopeuteen [2]. Tämän seurauksena quenchin syntyminen on mahdollista havaita resistiivistä jännitettä mittaamalla. Menetelmä on yleisin Nb-Ti ja Nb₃Sn -suprajohdemagneeteissa, ja quenchien havaitseminen on edelleen riippuvainen siitä [6].

Ongelma HTS-magneeteissa on normaalitilan leviämisenopeuden hitaus verrattuna LTS-magneetteihin. HTS-magneeteilla voi samankokoisen normaalitilan muodostumiseen mennä 50 kertaa pidempi aika kuin LTS-magneeteilla. Koska normaalitilan leviämisenopeus on pienempi, tarvitsee kuumen kohdan lämpötilan olla paljon suurempi, jotta jännite olisi mahdollista havaita. Yksiulotteisesti tapahtuva havaitseminen ei ole toimiva, jolloin siirtyminen kolmiulotteiseen (3D) tapaan voi auttaa. Nostamalla normaalitilan leviämisenopeutta tai kehittämällä poikittaista lämmön leviämistä, olisi mahdollista parantaa 3D-quenchin leviämistä, joka tekisi niiden havaitseminen helpompaa. [6]

Mittauksista on saatu selville, että quenchin havainnointi olisi mahdollista jännitteisiin perustuvalla menetelmällä HTS-magneeteissa, koska 3D normaalitilan leviämisenopeus oli tarpeeksi suuri. Kuitenkin korkean magneettikentän magneeteissa havaintomenetelmän tehokkuus on kyseenalaista johtuen pienemmästä etenemisnopeudesta. [7]

3.1.2 Hallin sensorit

Hallin sensorit ovat yksi mahdollinen ei-jännitteeseen perustuva menetelmä quenchien havaitsemiseen. Menetelmässä koko johdin jaetaan kahdeksi yhtä leveäksi osaksi lukuun ottamatta virranjohtimen lähellä olevia alueita. Lähelle näitä alueita jätetään suprajohtavia vyöhykkeitä, niin sanottuja siltoja, jotka yhdistävä jaetut alueet. Hallin sensori asetetaan osoittaen johdon pintaan päin halkaistun osan kohdalle. Kuvassa 4 (a) havainnollistetaan miten muokkaus tehdään. [8]

Suprajohtavassa tilassa molemmilla johtimen halkaistuilla alueilla kulkee yhtä

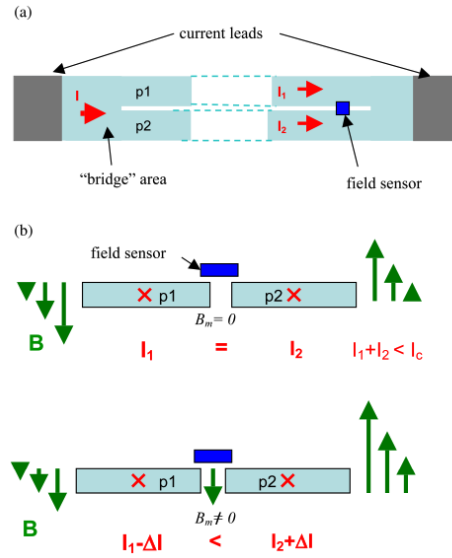
suuri kuljetusvirta, joka luo johdon ympärille magneettikentän. Magneettikenttä on suurin alueiden reunoilla, jossa se on myös johdon pinnan normaalin suuntainen. Halkaistun alueen sisällä kenttä on nolla. Molemmissa osissa kulkee saman suuruisen virta, joten niiden synnyttämät magneettikentät ovat yhtä suuret, sekä vastakkaisuuntaiset raon kohdalla. Ne siis kumoavat toisensa halkaistun alueen sisällä. [8]

Kun ensimmäisen osan, p_1 , virta vähenee, pysyy toisen osan, p_2 , virta silti samana. Silloin virta jakautuu uudelleen osien välillä, joka tapahtuu samaan aikaan kuin virran väheneminen p_1 :ssä. Tämän ominaisuuden avulla on mahdollista selvittää minkä magneettikentän anturin kohdalla, eli missä johdon osassa virran väheneminen on tapahtunut. Virran väheneminen p_1 :ssä aiheuttaa sen magneettikentän pientymisen eikä kentät enää kumo toisiaan, joten rakojen välissä kentän arvo poikkeaa nolasta. Tätä havainnollistetaan kuvassa 4 (b). [8]

Tämä on vain yksinkertaistettu kuvaus menetelmästä, koska suprajohteen virran pientymisen kriittiset kohdat ovat paljon monimutkaisempia. Kuitenkin se kuvaa tarpeeksi hyvin magneettikentän käyttäytymistä raossa virran jakaantuessa epätasaisesti osien välillä. Lisäksi on otettava huomioon, että tekniikka soveltuu paremmin tasa- kuin vaihtovirrälle. Vaihtovirralla suprajohteen virran häviöt aiheuttavat rajallisen resistanssin koko johdon pituudella, mikä vähentää sen herkkyyttä. Tasavirralla menetelmä soveltuu siis paremmin. Sen tarkkuus on paljon suurempi verrattuna jännitteen mittaukseen perustuviin menetelmiin, mikä tekee siitä potentiaalisen käytännön sovelluksiin. [8]

3.1.3 Akustinen termometria

Ääniaaltoihin perustuva lämpötilan muutoksien mittaus on potentiaalinen tapa kuumien kohtien monitorointiin. Menetelmä perustuu lämmön aiheuttamaan aallon taajuudenmuutokseen. Mittaaminen tehdään virittämällä samanaikaisesti monia erilai-



Kuva 4. (a) Havainnollistava kuva 2G johdon muokkauksesta, jossa johdin jaetaan kahteen yhtä leveään osaan p1 ja p2, ja osat ovat yhdistettynä virranjohtimen lähellä oleviin suprajohtaviin siltoihin, sekä magneettikentän sensorin paikasta. (b) Molemmissa osissa kulkevan virran aiheuttama magneettikentän suunta ja suuruus niiden välissä, kun virrat ovat yhtä suuret (ylempi) ja kun niiden arvot poikkeavat toisistaan (alempi). [8]

sia ääniaaltoja ja seuraamalla niiden transienttivasteen muutosta. [9]

Akustinen termometria on lämpötilan mittauksessa käytetty menetelmä, joka hyödyntää äänen nopeuden lämpötilariippuvuutta aineessa. Menetelmä mittaa lämpötilan muutosta äänen nopeuden muutosten avulla. Tämä tapahtuu lähettämällä äänipulssi aineeseen ja mittaamalla aikaa, joka äänipulssilla kuluu kulkiessaan aineen läpi. Menetelmä toimii nesteillä ja kaasuilla hyvin, mutta kiinteissä aineissa äänen nopeuden muutos lämpötilan muutosta kohtaan on liian pieni ollakseen käytännöllinen. [9]

Toinen ongelma on kiinteiden aineiden aaltojen moninaisuus. Puristus-, liuku- ja kierto-aallolla, sekä Lamb-pinta-aalloilla on erilaiset ryhmänopeudet, ja ne voivat kehittyä muodosta toiseen kappaleen pintaa ja rajapintoja pitkin. Ne "vaimentavat" synnytetyn äänipulssin, joka synnyttää useita transientti värähtelyjä ja aaltomuo-

tojen muunnoksia ennen kuin sen energian muuttuu lämmöksi. Toisaalta kappaleen transientin vaimenemisnopeus näihin muutoksiin on verrannollinen mekaaniseen energiahäviöön. Ja tällöin äänipulssien aiheuttama muutos transienttivasteeseen on havaittavissa, kunhan äänipulssien välinen lähetysaika on pidempi kuin transientin vaimenemisnopeus. [9]

Kimmoakoiden lämpötilariippuvuus aiheuttaa lämpöperäistä transientin vaihtelua. Ääniaaltojen muodostaman transientin lämpötilasta aiheutuneen taajuusmuutoksen odotetaan olevan samaa suuruusluokkaa kuin äänen nopeuden muutos. Taajuuden muutos on kuitenkin helpompi havaita, koska käytetään apuna aineen melko suurta mekaanista Q -kertoainta. Q -kerroin määritellään transientin värähtelyjaksojen määrällä, jonka aikana sen amplitudi pienenee kertoimella e^π . Esimerkiksi kun $Q \sim 10^4$ huoneenlämpötilassa ja $> 10^6$ 4,2 K lämpötilassa, lämmön aiheuttamia taajuuden siirtymiä pystytään seuraamaan jatkuvana värähtelynä tai pulssimaisena transienttiaaltona. [9]

Suprajohtavat magneettikämit ovat rakenteellisesti niin monimutkaisia, että erilaisia mekaanisia-aaltoja voi syntyä samanaikaisesti. On siis yksittäisten muutosten sijaan kannattavampaa seurata kokonaisuudessaan transienttivasteen muutoksia. Näitä kokonaisvaltaisia muutoksia pystytään seuraamaan lähettämällä kappaleeseen pulssi ajanhetkellä t_0 ja tallentamaan ajan t_w pituinen korjattu osa transientin aallonmuodosta alkaen hetkestä $t_0 + \Delta t$. Referenssiksi tallennettua ensimmäinen aaltomuotoa $f_0(t)$ verrataan jokaiseen seuraavaksi tallennettuun aaltomuotoon $f_i(t)$ ristikorrelaation avulla, josta muutos saadaan selville. Mittauksien tulokset osoittavat menetelmän potentiaalin tulevaisuudessa. Sillä pystyttiin selvittämään quenchistä aiheutuneet alle 1 K lämpötilanmuutokset suprajohteessa 77 K lämpötilassa. [9]

3.1.4 Kapasitanssia hyödyntävä

Kapasitanssiin C vaikuttavia tekijöitä suprajohdemagneeteissa ovat mekaaniset, termiset, sähköiset ja fluidin dynaamiset ominaisuudet quenchin syntyessä. Suprajohdemagneetin kelassa quenchin kehittyminen ei muuta kelasydämen rakenteen kokoa tai lämpötilaa, mutta quenchin aikana vapautunut lämpö aiheuttaa itse kelan laajenemisen. Kelan laajetessa sen etäisyys, d , kelansydäimestä pienenee ja kapasitanssi

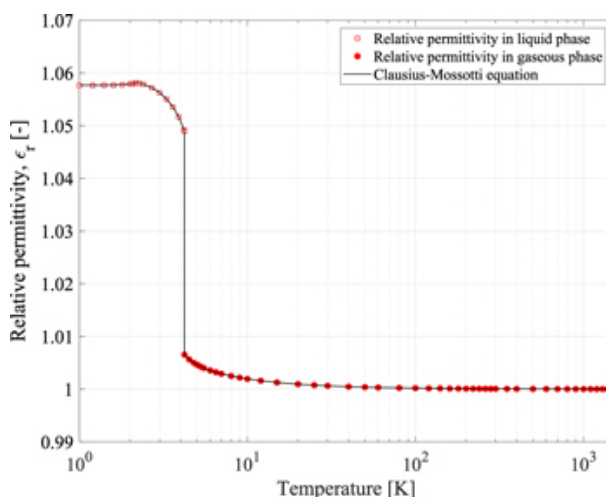
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad (8)$$

kasvaa. [10]

Kuitenkin alle 30 K lämpötiloissa muutokset ovat oletettavasti niin pieniä, että kapasitanssin muutosta on vaikea huomata. Ratkaisuksi on ehdotettu eristekerroksien kyllästämistä kylmällä nesteellä kuten nestemäisellä heliumilla tai tyrellä. Faasitransitiossa nesteestä kaasuksi, aineen tiheys ρ pienenee ja näin ollen aineen suhteellinen permittiivisyys ϵ_r laskee huomattavasti Clausis-Mossotin yhtälön

$$\frac{3M \epsilon_r - 1}{4\pi \epsilon_r + 2\rho} = p, \quad (9)$$

jossa p on aineen ominaispolarisoituma ja M nesteen moolimassa, mukaan. Kuvasta 5 nähdään heliumin ϵ_r muutos lämpötilan funktiona, kun se on mitattuna normaali-ilmanpaineessa neste- ja kaasufaasissa, sekä miten yhtälön (9) avulla lasketut arvo sopivat mittapisteisiin. Näin ollen paikassa, jossa lämpöä vapautuu, nestettä haihtuu ja tällöin ϵ_r pienenee. Samoin pienenee C kaavan (8) mukaan. Kun tarkkaillaan systeemin hajakapasitanssin eli eristeen kapasitanssin muutosta, voidaan ennen quenchin syntymistä havaita kuumien kohtien ilmestymiset. Näissä kohdissa tapahtuu faasitransitio ja hajakapasitanssi pienenee. Varsinkin HTS-magneeteille menetelmä olisi varsin lupaava, koska niiden kriittiset lämpötilat ovat paljon korkeammat kuin heliumin kiehumispiste. Pienet lämpötilan muutokset voidaan siis havaita hajakapasitanssin muutoksina. [10]



Kuva 5. Mitatut arvot neste- ja kaasufaasissa olevan heliumin suhteelliselle permittiivisyydelle lämpötilan muuttuessa normaali-ilmanpaineessa verrattuna Clausius-Mossotin yhtälöllä (9) laskettuihin arvoihin. [10]

Kokeelliset tulokset osoittavat menetelmän olevan tarpeeksi herkkä muutoksille, joten se olisi tehokas tapa havaita kuumat kohdat ennen quenchin syntymistä. Yhden sekunnin lämpöpulsseja lähetettiin 10 mm pituisiin kuumiin kohtiin ja niiden hajakapasitanssin muutos pystyttiin mittaamaan jo 0,3 J lämpöpulssista. Koska kapasitanssin muutos riippuu kiehuneen heliumin määrästä, voi se aiheuttaa vääriä havaintoja quencheistä, mikäli lämmön määrä riittää heliumin haihduttamiseen muttei quenchin syntymiseen. Tämä ongelma pystytään kuitenkin ratkaisemaan määrittämällä havainnointikynnys tarkemmin. [10]

3.1.5 Radiotaajuuksia hyödyntävät

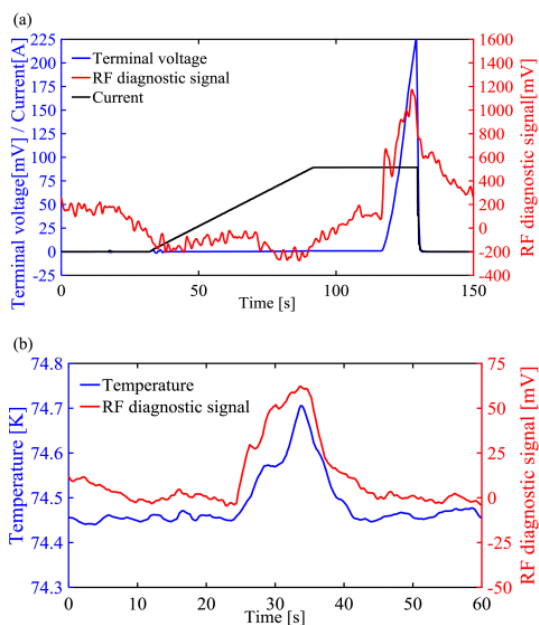
Radiotaajuuksia (RF) (engl. radio frequency), erityisesti mikroaaltoja, hyödyntävän mittausteknologian soveltuvuutta on tutkittu quenchien havaitsemiseen. Teknologia perustuu siirtojohdossa kulkevan RF-signaalin kokemaan siirtymäimpedanssiin (engl. transient impedance), joka voi olla siirtojohdon keskikohdassa tai päädyssä olevassa toisessa komponentissa. Kun RF-signaalin kokema impedanssi on vakio, se jatkaa etemistä normaalisti, mutta impedanssin muuttuessa muodostuu RF-

signaalissa heijastus. Quenchin syntyminen magneetissa aiheuttaa muutoksen impedanssissa, joka taas synnyttää RF-signaalin heijastumisen ja muuttaa signaalin heijastusparametreja. Seuraamalla heijastusparametrien muutoksia on mahdollista arvioida quenchin syntymistä. [11]

Tutkimuksessa havaittuja menetelmän ongelmia oli mm. RF-signaalin suuri vaihtelu. Tuloksista kävi ilmi, että virralla aiheutetun quenchin havaitseminen oli radiotaaajuuden aaltoja käyttävällä menetelmällä hitaampaa verrattuna päälaitteen jännitysmittaukseen perustuvaan menetelmään. Lämpötilalla aiheutetun quenchin havaitsemisen tulokset olivat lupaavampia. RF-aaltomenetelmän ja jännitemenetelmän viive oli lähes olematon. Tämä voidaan havaita kuvasta 6 (a), jossa molemmat havainnointimenetelmät ja virran muutos oli esitetty ajan funktiona. Lämpöpulssi on syötetty kohtaan, joka näkyy mustana nuolena virran käyrässä. Kuvasta 6 (b) voidaan myös huomata punaisella merkityn RF-signaalin käyrän kasvun nousevan sinisen lämpötila käyrän kanssa samaan aikaan. Tämä osoittaa sen, että RF-signaali heijastaa lämpötilan aiheuttaman impedanssin muutoksen. [11]

Signaalin suuri vaihtelu on edelleen ongelma. Myös quenchin jälkeen on huomattu, ettei RF-signaali palaa enää alkuperäiseen referenssikohtaan. Koska RF-signaali ei ole riippuvainen mitenkään suprajohtavan käämin virrasta, suprajohteen impedanssi pystytään tarkastamaan etukäteen. Tällä tavoin olisi mahdollista määrittellä suprajohtemagneetin energisoinnin kannattavuutta, mitä myös mittausten tulokset tukevat. [11]

Menetelmän hyödyntäminen toimisi paremmin matalan lämpötilan suprajohteissa, koska quench on niissä paljon voimakkaampi. Tämä pienentää viivettä havaitsemisessa. RF-aalto teknologialla on suurempi potentiaali LTS magneeteissa tapahtuvien quenchien havaitsemiseen. [11]



Kuva 6. (a) Kuvaaja lämpötilan muutoksella aiheutetun quenchin havainnointi RF- ja jännite menetelmällä ajan funktiona. (b) Kuvaaja lämpötilan ja RF-signaalin muutoksesta ajan funktiona. [11]

3.1.6 Fiber Bragg Grating

Fiber Bragg Grating (FBG) on taitekertoimen jaksollinen muokkausmenetelmä, jonka avulla on mahdollista suodattaa valon eri aallonpituuksia. Menetelmä perustuu Braggin lakiin, eli siihen miten valon eri aallonpituudet heijastuvat osuessaan hilaan. FBG:n taitekertoimen jaksottainen muokkaus tehdään optisen kuidun ytimeen altistamalla se tietyn muotoiseen kuvioon UV-laserilla. Kun valo kohdistetaan ytimen Braggin hilaan, se heijastaa vain tietyt aallonpituudet ja näin ollen toimii heijastavana suodattimena. FBG:n Braggin heijastumisen aallonpituus

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (10)$$

riippuu valokuidun ytimen efektiivisestä taitekertoimesta n_{eff} ja hilan jaksollisuudesta Λ . [12]

FBG:n herkkä reagoiminen lämpötilan muutoksiin ja johteessa tapahtuville kuorimituksille, tekee siitä potentiaalisen monitorointimenetelmän suprajohteiden syöt-

töjohdoille. Lämpötilan nousu synnyttää termo-optisen efektin, joka n_{eff} :n muutoksen, ja lasin lämpölaajeneminen aallonpituuden jakson muutoksen. [12]

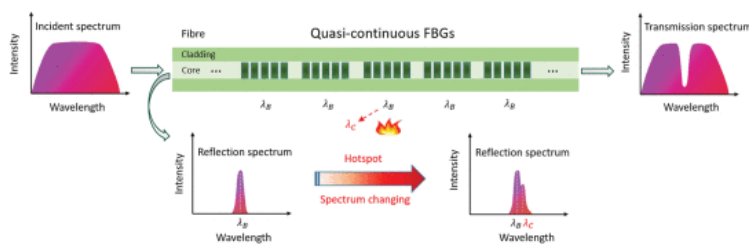
Menetelmässä muutokset havaitaan seuraamalla Braggin aallonpituuden spektrin muutosta. FGB:ssä spektrin huipun siirtymä korreloi lämpötilan ja rasituksen muutoksena [13]. Ongelmaksi on kuitenkin muodostunut herkkyyden heikentyminen jo 50 K lämpötilassa. Suprajohdemagneeteissa FBG-antureita sovelletaan kehittämällä niihin perustuvaa rasituksen seurantajärjestelmää. Toinen FBG:n haasteista on niiden koko. Kun anturit integroidaan resistiivisten venymäliuskojen kanssa, niiden mahdolluttaminen suprajohtavan magneetin kaapeleiden sisään voi olla vaikeaa. Kuitenkin onnistuneella toteutuksella on lupaavia mahdollisuuksia uudenlaiseen vaihtoehtoon tai täydentävään mittalaitteeseen suprajohtavien magneettien resistiivisille venymäliuskoille [12].

3.1.7 Ultra-long-Fiber Bragg Grating

Ultra-long-Fiber Bragg Grating (ULFBG) on saman tyyppinen menetelmä kuin FBG, mutta siinä optiseen kuituun piirretään näennäisesti-jatkuvia saman Braggin aallonpituuden omaavia FBG-hiloja. ULFBG:ssä FBG-hilat toimivat samaan tapaan kuin gaussin heijastimet (engl. gaussian reflector), koska kaikilla hiloilla on sama Braggin aallonpituus. Kuvassa 7 havainnollistetaan ULFBG:n toimintaperiaatetta. [13]

ULFBG:ssä esiintynyt kuuma kohta voidaan havaita seuraamalla sen spektrin muutoksia. Kyseiset kohdat aiheuttavat FBG-hilan Braggin aallonpituuden kasvun, joka esiintyy spektrin siirtymisenä alkuperäisestä kohdasta. Tämän siirtymän avulla pystytään löytämään kuuman kohdan esiintyminen, kuten kuvassa 7 on esitetty. [13]

ULFBG:ssä spektrin seuranta on kuitenkin haastavampaa kuin pelkän FBG:n, koska HTS-käämiin liitettynä spektri niin sanotusti vääristyy. Tämä esiintyy monen huipun monimutkaisena spektrinä, jonka muutokset esiintyvät monella eri tavalla,



Kuva 7. ULFBG:n toimintaperiaatetta kuvaava kaavioesitys. [13]

mikä tekee havaitsemiseen soveltuvan algoritmin kehityksestä haasteellista. [13]

Spektrien monimutkaisuus johtuu rasitusjakaumasta, joka korostuu kylmissä lämpötiloissa. Ratkaisuna tälle ongelmalle tutkijat ovat ehdottaneet spektrin keskiaallonpituuden muutoksen seuraamista jokaisen aallonpituuden, λ_i , kohdalla käyttämällä spektrin intensiteetin, I , painotettua keskiarvoa

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\sum I(\lambda_i, t) \lambda_i}{\sum I(\lambda_i, t)}. \quad (11)$$

Muutoksen $\bar{\lambda}$ etumerkin avulla voidaan päätellä kumpaan suuntaan lämpötila on muuttunut. Kuumen kohdan ilmentyessä tietyn FBG-hilan Braggin aallonpituus suurenee nostaen näin myös keskiaallonpituus. Kuumien kohtien havaitseminen missä tahansa ULFBG:ssä on mahdollista seuraamalla ja mittaamalla keskiaallonpituutta jatkuvasti. [13]

Tutkimus osoittaa ULFBG:n potentiaalin tulevaisuudessa, koska sillä on pystytty sekunnin murto-osassa havaitsemaan kuumien kohtien syntymisen sensorien päässä 1 K tarkkuudella 80 K lämpötilassa [13].

3.1.8 Optinen taajuusalueen heijastuminen

Rayleightin takaisin siroutumaan perustuvalla optisen taajuusalueen heijastuman (engl. optical frequency-domain reflection (OFDR)) teknologialla on potentiaali soveltua quenchieen havainnointiin HTS:ssä, sen jatkuvan tilan mittaussyvyn ja nopean lämpövasteen ansiosta. Systemillä on saavutettu 0,001 °C tarkkuus huoneen lämpötilassa. Lämpöhäiriöiden havainnointikokeet osoittavat menetelmän pystyvän ha-

vaitsemaan nopeasti kuumat kohdat ennen lämmön muodostumisessa johteessa, missä tahansa kohdassa testikuitua. [14]

OFDR:n toiminta perustuu viiteen vaiheeseen. Ensin viritettävä laserlähde (engl. tunable laser source (TLS)) emittoi lineaarisesti taaajuuspyyhkäistyä koherenttia valoa, joka osuu testattavaan kuituun (FUT). Toisessa vaiheessa kerätään tuotetun RBS-signaali- ja referenssivalon lyöntitaajuussignaali (engl. beat frequency signal), toisin sanoen aika-taajuussignaali

$$I(t) = 2\sqrt{R(\tau)}E_0^2 \cos\left[2\pi\left(f_0\tau + \gamma\tau t - \frac{1}{2}\gamma\tau^2\right) + \psi\right], \quad (12)$$

jossa $R(\tau)$ on FUT:n heijastuneisuus, f_0 TLS:n alkuperäinen taajuus, γ viritysaste, E_0 TLS:n syöttämän optisen kentän intensiteetti, τ FUT:n aika viive z-akselilla, $\gamma\tau = f_b$ z-akselin suuntainen kahden säteen lyöntitaajuus ja $\psi = \psi_r - \psi(\tau)$ signaali- ja referenssivalon vaihe-ero. [14]

Kolmanneksi muutetaan aika-taajuussignaali nopealla Fourierin muunnoksella taajuusalue-signaaliksi ja valitaan heikot heijastuspisteet, z_1 ja z_2 , alueelta. Neljännessä vaiheessa kerätään tieto kahden heijastuspisteen aallon vaiheesta. Pisteiden keskinäinen vaihe saadaan niiden aallon vaiheen erotuksella $\Delta\Phi_i = \psi_i(z_1) - \psi_i(z_2)$. Viides vaihe on purkaa $\Delta\Phi$ aika-akselilla, jotta saadaan $\Delta\varphi$, joka on verrannollinen lämpötilan muutokseen $\Delta T \propto \Delta\varphi$. [14]

Heijastuspisteiden välisellä etäisyydellä on merkitys niin menetelmän tehokkuuteen kuin mittauskohinan suuruuteenkin. Tällä hetkellä tutkijat etsivät optimaalisinta heijastuspisteiden välistä etäisyyttä. Tulevaisuudessa OFDR:llä on kuitenkin hyvät mahdollisuudet soveltua quenchien havaitsemiseen HTS:ssä. [14]

4 Yhteenveto

Tutkielmassa käsiteltiin quenchettä ilmiönä ja sen syntyyn vaikuttavia tekijöitä, sekä käytiin erilaisia menetelmiä niiden havaitsemiseen HT- ja LT-suprajohteissa. Tutkiel-

ma painoittui enemmän HT-suprajohteiden havaintomenetelmiin, sillä niiden tutkimus on edelleen kesken.

LTS:n quenchien havainnointi perustuu pitkälti jännitettä hyödyntäviin menetelmiin, mutta HTS:ssa se ei ole käytännöllinen johtuen pienemmästä leviämismisnopeudesta [7]. Tutkijat ovat esittäneet useita potentiaalisia havaintomenetelmiä, joita pyritään kehittämään jatkuvasti eteenpäin. Menetelmistä Hallin sensoreilla, akustista termometriaa ja kapasitanssin mittausta hyödyntävää, sekä OFDR:lla on mahdollisuus kehittyä käytännön sovelluksiin asti, kun menetelmissä esiintyvät ongelmat saadaan tulevaisuudessa ratkaistua. Quenchien havainnoinnin kehitys on tärkeää HTS:n käytännönsovellusten kannalta.

Viitteet

- [1] C. P. Poole, H. A. Farach, R. J. Creswick ja R. Prozorov, kirjassa *Superconductivity (Second Edition)*, second edition ed., toimittanut C. P. Poole, H. A. Farach, R. J. Creswick ja R. Prozorov (Academic PressAmsterdam, 2007).
- [2] L. Dresner, *Stability of Superconductors*, 1 ed. (SpringerDordrecht, 1995).
- [3] M. N. Wilson, *Superconducting magnets, Monographs on cryogenics ; 2* (Clarendon pressOxford, 1983).
- [4] P. Laukkanen ja R. Vainio, *FFYS6039 Aineen olomuodot ja ominaisuudet* (Fysiikan ja tähtitieteen laitos, Turun yliopisto, 2020).
- [5] M. Murtomaa ja T. Laitinen, *Sähkö- ja magnetismioppi I* (Fysiikan ja tähtitieteen laitos, Turun yliopisto, 2019).
- [6] T. Shen, L. Ye, D. Turrioni ja P. Li, *Superconductor Science and Technology* **28**, 075014 (2015).
- [7] T. Shen, L. Ye ja P. Li, *Superconductor Science and Technology* **29**, 08LT01 (2016).
- [8] M. Marchevsky, Y.-Y. Xie ja V. Selvamanickam, *Superconductor Science and Technology* **23**, 034016 (2010).
- [9] M. Marchevsky ja S. A. Gourlay, *Applied Physics Letters* **110**, 012601 (2017).
- [10] E. Ravaioli, D. Davis, M. Marchevsky, G. Sabbi, T. Shen, A. Verweij ja K. Zhang, *Physica Scripta* **95**, 015002 (2019).
- [11] B. Chen, Y. Hu, J. Li, B. Yu ja P. Fu, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **30**, 1 (2020).
- [12] A. Chiuchiolo, M. Bajko, J. C. Perez, H. Bajas, M. Consales, M. Giordano, G. Breglio ja A. Cusano, *IEEE Photonics Journal* **6**, 1 (2014).
- [13] X. Huang, M. Davies, D. A. Moseley, J. T. Gonzales, H. W. Weijers ja R. A. Badcock, *IEEE Sensors Journal* **22**, 11775 (2022).
- [14] K. Xie, M. Wang, W. Feng, H. Jia, L. Cao, J. Wu ja G. Tu, *IEEE Sensors Journal* **23**, 28978 (2023).