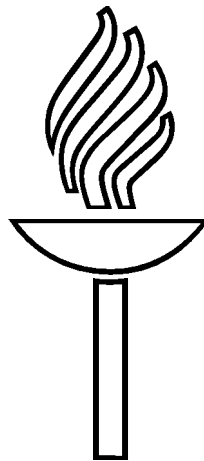


Pro Gradu

**Tunneliliitosten ominaisuuksien parantaminen
lämpökäsittelyllä**



Lasse Väistö

12. lokakuuta 2006

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

Esipuhe

Haluan kiittää dosentti Ilari Maasiltaa ohjauksesta kuluneen kahden vuoden aikana, mitä olen työskennellyt fysiikan laitoksella.

Tutkija Panu Koppiselle haluan antaa erityiskiitoksen ohjauksesta tätä työtä tehdessä. Opin häneltä paljon sekä mittaustekniikasta että fysiikasta yleensäkin.

Lopuksi haluan ilmaista kiitollisuuteni kaikille työtovereilleni Nanoscience Center:ssä.

Jyväskylä, lokakuu 2006

Lasse Väistö

Sisältö

Esipuhe	i
1 Johdanto	1
2 Teoria	3
2.1 NIN-tunneliliitokset	3
2.1.1 Varautumisilmiöt	6
2.1.2 Ikääntyminen	7
2.2 SIS-tunnelointi	8
2.3 Elektronin vapaa matka	9
2.4 Tunneliliitosten lämpökäsittely	11
3 Kokeelliset menetelmät	13
3.1 Näytteenvalmistus	13
3.1.1 Elektronisuihkulitografia ja tyhjiöhöyrystys	14
3.2 Lämpökäsittelyprosessi	18
3.2.1 Lämpötilan mittauksen ongelmia	18
3.3 Matalan lämpötilan mittaukset	20
4 Mittaukset	22
4.1 Huoneenlämpötilamittaukset	22
4.2 SINIS-näytteet	23
4.3 Vapaa matka	24
4.4 NIN-liitokset	25

SISÄLTÖ

4.5 SIS-liitokset	27
5 Johtopäätökset	30
Viitteet	31

Luku 1

Johdanto

Nanoteknologia on sana joka nykyään esiintyy juhlapuheissa ja tulevaisuuden visioissa. Vaikka se ei vielä olekaan rahasampo, tulevaisuudennäkymät ovat valoisat. Nanotiedeiden tutkimukseen sijoitetaan rahaa joka vuosi enemmän, sekä yksityisellä että valtiollisella sektorilla. Teollisuuden aloista pisimmällä on elektroniikkateollisuus, joka pyrkii jatkuvasta pienentämään tuotteitaan. Mikrosirut ovat jo kutistuneet nanometriskaalaan.

Kaikki sellaiset tuotteet ovat nanoteknologiaa, joissa vähintään yksi dimensio on alle mikrometrin. Muutamia satoja nanometrejä paksu kalvo on nanoteknologiaa pinta-alasta riippumatta, koska sen paksuus on nanometriskaalassa. Makroskooppisen pituinen kuitu, jonka paksuus on satoja nanometrejä on myös nanoa.

Nanoteknologian tutkimus on poikkitieteellistä. Biologit, kemistit ja fyysikot tekevät yhteistyötä. Esimerkiksi DNA-molekyyleistä eivät ole kiinnostuneet ainoastaan biologit ja rikospaikkatutkijat, fyysikot ja kemistit tutkivat mahdollisuuksia käyttää DNA-molekyylejä nanoelektronikan komponenteissa. DNA:ta voidaan käyttää esimerkiksi antureissa [1] sekä hiilinanoputkien vastakappaleina itsejärjestyvissä transistoreissa [2].

Tunneliliitokset ovat yksi tärkeimmistä nanoteknologian komponenteista. Esimerkiksi Coulombin saartoon perustuva lämpömittari (Coulomb Blockade Thermometer, CBT) [3] on alle yhden Kelvinin lämpötilojen mittaamiseen käytetty primäärinen lämpömittari, joka perustuu sarjaan normaalitilaisia tunneliliitok-

sia. Jäähdyttimenä tai sekundäärisenä lämpömittarina voidaan käyttää SINIS-rakennetta [4], joka koostuu kahdesta sarjaan kytketystä tunneliliitoksesta, joissa toinen metallielektrodi on suprajohtava ja toinen normaalimetalli.

Vaikka tunneliliitoksia on tutkittu jo kymmeniä vuosia, niiden ominaisuuksia ei vieläkään tunneta täysin. Suurena ongelmana tunneliliitoksissa on mm. niiden ikääntyminen, eli ominaisuuksien muuttuminen ajan kuluessa. Tästä syystä tunneliliitoksia sisältäviä komponentteja ei ole voitu sijoittaa laitteisiin, joita on tarkoitus käyttää pitkään ja joiden huoltaminen on vaikeaa. Esimerkiksi satelliittiin sijoitettavien komponenttejen on toimittava ilman huoltoa useita vuosia.

Ratkaisuksi ikääntymiseen löydettiin tunneliliitosten lämpökäsittely, mitä on aikaisemmin tutkittu lähteessä [5] ja tutkimusta on jatkettu tässä työssä. Normaalisti tunneliliitoksen stabiloituminen kestää useita kuukausia, jopa vuosia, mutta lämpökäsittelyllä liitokset on kuitenkin saatu stabiloitumaan. Lisäksi anniilausprosessin havaittiin parantavan monia tärkeitä liitosten ominaisuuksia.

Luku 2

Teoria

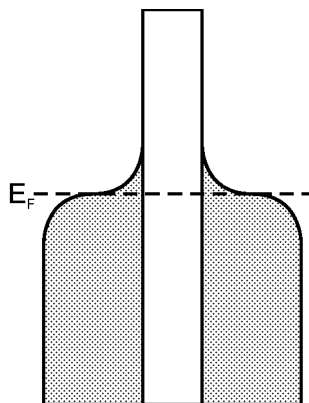
2.1 NIN-tunneliliitokset

Tunneliliitos koostuu kahdesta metallijohtimesta, jotka on sähköisesti erotettu toisistaan ohuella eristekerroksella, jonka paksuus on tyypillisesti noin 20-30 Å [6]. Vaikka johtimet eivät ole sähköisessä kontaktissa keskenään, elektronit voivat tunneloitua eristekerroksen läpi. Eristekerrosta voidaan yksinkertaisimmassa tapauksessa approksimoida suorakaidepotentiaalilla (kuva 2.1) [7]. Virtaa tunneliliitoksen läpi kutsutaan tunneloitumisvirraksi. Jos tunneloitumisen oletetaan olevan elastinen, eli tunneloituminen voi tapahtua vain vaakasuoraan (vrt. kuva 2.1), tunneloitumisvirran yleinen muoto on [8]

$$I \propto |T|^2 \int_{-\infty}^{\infty} N_1(E)N_2(E + eV)[f(E) - f(E + eV)]dE, \quad (2.1)$$

missä V on jännite-ero liitoksen yli, $N_1(E)$ ja $N_2(E + eV)$ ovat tilatiheydet liitoksen eri puolilla, f on Fermi-Dirac jakauma, $|T|^2$ on tunneloitumistodennäköisyys.

Elektronin tunneloituessa kuvavarauspotentiaali (ks. kuva 2.2) pienentää sekä potentiaalivallin leveyttä että korkeutta pyöristämällä vallin kulmia [7]. Elektronin kulkiessa potentiaalivallin läpi, se Coulombin vuorovaikutuksesta johtuen polarisoi varausjakaumaa vallin molemmilta reunoilta, mistä aiheutuu potentiaalivallin pienentyminen. Ottamalla huomioon kuvavarauspotentiaali, potentiaalivallin lausekkeeksi saadaan [7]



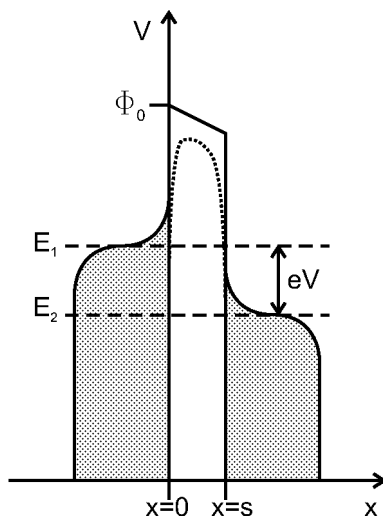
Kuva 2.1: Suorakaiteella kuvattu potentiaali sekä energiatasot, joissa termisesti viiritetyt elektronit ovat jättäneet tyhjiä tiloja fermienergian (E_F) alapuolelle. Varjostettu alue kuvaa miehitettyjä tiloja lämpötilassa $T > 0$. Nollalämpötilassa elektronit miehittäisivät kaikki energiatilat fermienergian asti, jolloin energiatasot olisivat porrasmaisia ja maksimienergia olisi E_F .

$$V(x) = \Phi_0 - \frac{eVx}{s} - 1.15\lambda \frac{s^2}{x(s-x)}, \quad (2.2)$$

missä $\lambda = e^2 \ln(2)/(8\pi\epsilon\epsilon_0 s)$ ja s on eristekerroksen paksuus. Potentiaalivallin toinen reuna on kohdassa $x = 0$ ja toinen kohdassa $x = s$ (ks. kuva 2.2) Φ_0 on potentiaalivallin korkeus, toinen termi biasjännitteestä johtuva ja kolmas kuvavarauksesta johtuva. Tämä lauseke pätee vain vallin sisällä, koska vallin reunoilla kohdissa $x = 0$ ja $x = s$ lausekkeen (2.2) antama potentiaali ei ole fysikkaalinen.

NIN-tunneliliitoksissa johtimet ovat normaalitilaisia. Tunneloituminen voi tapahtua, jos vastakkaisella puolella potentiaalivallia on vapaa energiatila, jonka energia on sama kuin tunneloituvan elektronin. Tunneloitumistitaajuuteen vaikuttaa eristekerroksen paksuus ja rakenne, jännite-ero johtimien välillä sekä lämpötila.

Biasoimattomassa liitoksessa nettovirta vallin läpi on nolla. Biasoimalla liitos saadaan eripuolilla vallia olevia energiatasoja siirrettyä toisiinsa nähden siten (kuva 2.2), että tunnelointitajuus vallin läpi ei ole sama kumpaankin suuntaan. Tästä seuraa nettovirta liitoksen läpi. Tunneloitumisvirran lauseke (2.1) tulee NIN-liitosten tapauksessa muotoon [8]



Kuva 2.2: Biasoitu liitos jännitteellä V . Fermienergian tasoja saadaan liitoksen eri puolilla siirrettyä toisiinsa nähden siten, että niiden välillä on potentiaaliero eV ($E_1 > E_2$), josta seuraa nettovirta liitoksen läpi. Kuvavarauspotentiaali merkitty potentiaalivallin sisään katkoviivalla.

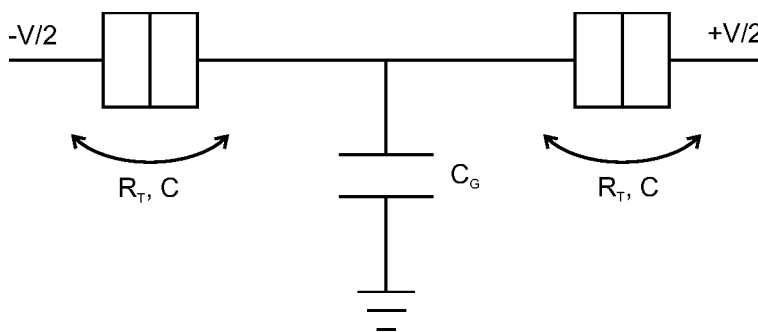
$$I_{nn} = \frac{2eA}{h} |T|^2 N_1(0) N_2(0) eV = G_{nn} V, \quad (2.3)$$

missä A on liitospinta-ala, h on Planckin vakio, $N_1(0)$ ja $N_2(0)$ ovat vapaiden elektronien tilatiheydet Fermi-pinnalla vallin eri puolilla ja G_{nn} on liitoksen konduktanssi. Liitos on siis ohminen, koska sen johtavuus ei ole jänniteriippuvainen.

Tunneloitumistaajuus kasvaa lämpötilan noustessa, koska lämpöenergia virittää elektroneja korkeammille viritystiloille. Tällöin alempia tiloja jää miehittämättä, joka helpottaa tunneloitumista. Tunneliliitoksen johtavuus on vahvasti lämpötilariippuvainen, sillä se on verrannollinen lämpötilan neliöön [9]. Hyvänä tunneliliitoksen merkinä pidetään 15% resistanssin nousua lämpötilan laskiessa 300 Kelvinistä 77 Kelviniin [9], eli tunneliliitoksen resistanssi käyttäytyy lämpötilan funktiona päinvastaisesti kuin normaalin metallin.

2.1.1 Varautumisilmiöt

Jos tunneliliitoksia on usempi sarjassa, niiden väliin jää sähköisesti eristettyjä saarekkeitä. Elektronit voivat liikkua saarekkeelle tai sieltä pois tunnelehtumalla eriste-kerroksen läpi. Koska tunnelehtuminen voi tapahtua yksi elektroni kerrallaan, tällaisia piirejä kutsutaan yhden elektronin laitteiksi, joista esimerkkinä on yhden elektronin transistori (Single-electron transistor, SET).



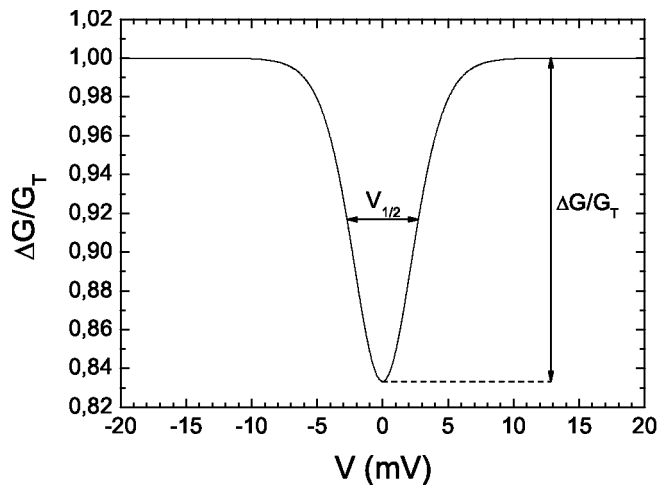
Kuva 2.3: Yksinkertainen malli yhden elektronin transistorista, jossa molemmat tunneliliitokset ovat identtisiä.

Yksinkertaisimmassa SET-rakenteessa (kuva 2.3) on kaksi identtistä tunneliliitosta sarjassa, molempien tunnelointiresistanssi on R_T ja kapasitanssi on C sekä kapasitanssi saarekkeen ja porttielektrodin välillä on C_G . Saarekkeen yhteiskapasitanssi on siis $C_\Sigma = 2C + C_G$ (yleensä $C_G \ll C$). Täten saarekkeen varautumisenergia, eli tarvittava työ joka vaaditaan saarekkeen varaamiseen yhdellä elektronilla, on

$$E_c = \frac{e^2}{2C_\Sigma}. \quad (2.4)$$

Biasoidaan liitosketjun toinen pää arvoon $-V/2$ ja toinen pää arvoon $+V/2$. Jos $|eV| > E_c$, on ketjun päiden välinen jännite riittävän suuri varaamaan saareke yhdellä elektronilla, jolloin virta kulkee ketjun läpi. Tällöin liitosketjun johtavuus $G_T = (2R_T)^{-1}$ on vakio. Liitosketjun johtavuus heikkenee jos $|eV| < E_c$, jolloin jännite ei riitä varaamaan saarekettä. Tätä heikon johtavuuden aluetta kutsutaan Coulombin saarroksi [10].

Coulombin saarrosta voidaan määrittää puoliarvoleveys $V_{1/2}$ (ks.kuva 2.4) ja piikin korkeus $\Delta G/G_T$. Esimerkiksi CBT-lämpömittarin toiminta perustuu puoliarvo-



Kuva 2.4: Coulombin saarrosta määritetty puoliarvoveveys ja piikin korkeus.

leveyden mittaamiseen [3], sillä kun $E_C \ll k_B T$, on puoliarvoveveys verrannollinen lämpötilaan, jolloin kahden liitoksen ketjulle saadaan [11]

$$\frac{eV_{1/2}}{2k_B T} = 5,44. \quad (2.5)$$

Coulombin saarron piikin korkeus voidaan määrittää samasta kuvaajasta. Piikin korkeus $\Delta G/G_T$ saadaan laskemalla nollajännitteellä saatavan konduktanssin minimin ja G_T :n suhteellinen ero. Piikin korkeus on hyödyllinen suure, koska siitä voidaan määrittää varautumisenergia. Jos liitosketjussa on kaksi tunneliliitosta sarjassa, varautumisenergia on [11]

$$E_c = 6k_B T \frac{\Delta G}{G_T}. \quad (2.6)$$

2.1.2 Ikääntyminen

Tunneliliitoksen ominaisuudet muuttuvat ajan kuluessa, eli liitos ikääntyy. Tärkeimmät ikääntymiseen vaikuttavat tekijät ovat ilmankosteus [12] ja oksidikerroksen kiderakenteen uudelleenjärjestyminen. Höyrystetyn metallikalvon, joka ei ole yksikiteinen, päälle kasvatettu oksidikerros ei muodosta täydellistä kiderakennetta,

vaan on amorfinen tai monikiteinen [13]. Kiderakenne on energieettisesti edullisempi kuin amorfinen, joten oksidikerros alkaa uudelleenjärjestymään kohti kiderakennetta.

Tunneliliitoksen ikääntyessä tunnelointiresistanssi kasvaa [14], mikä voi johtua joko oksidikerroksen paksuuntumisesta tai oksidikerroksen rakenteen muutoksesta. Oksidikerros voi paksuuntua, jos siihen diffundoituu lisää happea tai atomien uudelleenjärjestynyt kidemuoto vie enemmän tilaa kuin epäjärjestynyt muoto. Paksumpi oksidikerros pienentää todennäköisyyttä, jolla elektroni tunneloituu eristekerroksen läpi.

Oksidikerroksen rakenteen muuttuessa oksidikerroksen dielektrisyysvakio ϵ muuttuu. Tunneloitumisresistanssi kasvaa ϵ :n kasvaessa [7] (ks. yhtälö 2.2) ja kiderakenteen ϵ on suurempi kuin amorfisen aineen [15], joten rakenteen muutos voi selittää ikääntymisen aikana tapahtuvan resistanssin nousun. Tässä vaiheessa ei ole kuitenkaan mahdollista sanoa täsmällistä syytä ikääntymiseen.

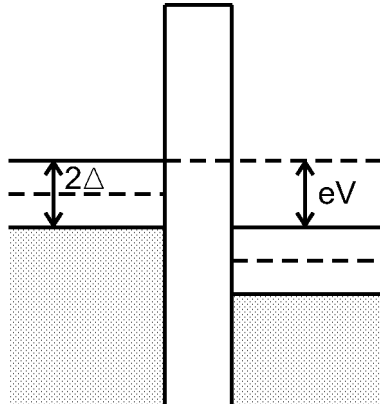
2.2 SIS-tunnelointi

SIS-tunneliliitoksessa eristekerroksen erottamat johtimet ovat suprajohtavassa tilassa. Suprajohteen energia-aukosta johtuen tunneloituminen SIS-liitoksissa poikkeaa normaalitilaisista liitoksista. Energia-aukko koostuu kielletyistä energiatiloista, joita elektronit eivät voi miehittää.

Kvasipartikkeleiden tunneloitumisvirran lauseke (2.1) tulee SIS-liitosten tapauksessa muotoon [8]

$$I_{ss} = \frac{G_{nn}}{e} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|E||E + eV|}{|E^2 - \Delta_1^2|^{1/2}|(E + eV)^2 - \Delta_2^2|^{1/2}} [f(E) - f(E + eV)] dE, \quad (2.7)$$

missä Δ_1 ja Δ_2 ovat energia-aukkojen suuruudet eri puolilla liitosta. Tässä työssä käsitellyissä liitoksissa molemmat johtimet ovat samaa metallia, jolloin $\Delta_1 = \Delta_2 =: \Delta$. Virta voi kulkea liitoksen läpi, jos se on biasoitu vähintään kaksi kertaa energia-aukon verran (ks. kuva 2.5), eli $eV > 2\Delta$. Tällöin energia-aukon reunalla olevat elektronit voivat tunneloitua vastakkaisen puolen energia-aukon yläpuolelle.



Kuva 2.5: SIS-liitos biasoituna siten, että energia-aukot liitoksen eri puolilla eivät ole kohdakkain. Miehityt tilat merkitty harmaalla.

SIS-liitoksen läpi kulkee myös supravirta nolajännitteellä, jolloin fermipinnalla olevat Cooperin parit pääsevät tunnelloitumaan [8]. Kuvassa 2.6 on esitetty virta jännitteen funktiona SIS-liitoksessa, jonka kvasipartikkelilihaarasta, eli energia-aukon ulkopuolisesta osasta, voidaan määrittää tunnelloitumisresistanssi R_T .

Kvasipartikkeleiden tilatiheys energia-aukon lähellä on vahvasti verrannollinen energiaan. Tilatiheydeksi saadaan [8]

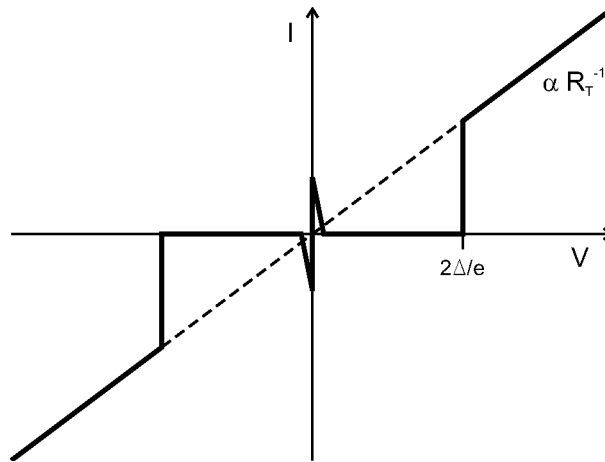
$$\frac{N_S(E)}{N(0)} = \begin{cases} \frac{|E|}{(E^2 - \Delta^2)^{1/2}} & , |E| > \Delta \\ 0 & , |E| < \Delta \end{cases} \quad (2.8)$$

Kaavasta (2.7) havaitaan konduktanssin olevan verrannollinen tilatiheyteen ja kaavasta (2.8) nähdään tilatiheyden kasvavan nopeasti lähestyttäessä energia-aukkoa. Tästä johtuen konduktanssi kasvaa voimakkaasti lähestyttäessä energia-aukkoa, kuten havaitaan kuvasta 2.7, missä on kuvattu konduktanssi jännitteen funktiona. Kuvasta havaitaan myös johtavuuden kasvu supravirran kohdalla.

2.3 Elektronin vapaa matka

Elektronin vapaa matka (mean free path) on keskimääräinen matka, jonka vapaa elektroni kulkee johtimessa ilman, että sen liikemäärä muuttuu huomattavasti.

Johtavuus metallijohtimessa on [16]



Kuva 2.6: SIS-liitoksen IV -käyrä on verrannollinen tunneloitumisresistanssiin R_T energia-aukon ulkopuolella. Aukon kohdalla ei kulje muuta virtaa kuin supravirta nollajännitteellä.

$$\rho = \frac{m^*}{ne^2\tau}, \quad (2.9)$$

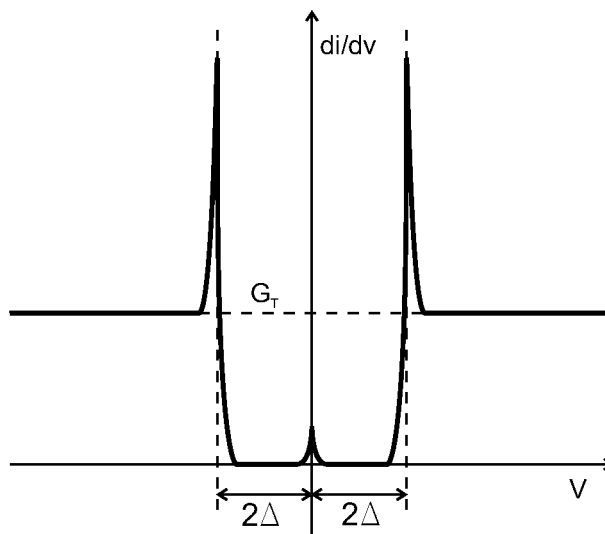
missä m^* on elektronin efektiivinen massa, n on vapaiden elektroneiden lukumäärätiheys johtimessa ja τ on keskimääräinen vapaaseen matkaan kuluva aika. Koska johtimen resistanssi $R = \rho l/A$, missä l on johtimen pituus ja A johtimen poikkipinta-ala, saadaan kaavasta (2.9) ratkaistua τ

$$\tau = \frac{lm^*}{ne^2AR}, \quad (2.10)$$

mistä saadaan vapaaksi matkaksi johteessa

$$l_{MFP} = \tau v_F = \frac{lm^*}{ne^2AR} v_F, \quad (2.11)$$

missä v_F on ferminopeus johtimessa, joka on materiaalikohtainen vakio. Esimerkiksi alumiinin ferminopeus on $2,03 \cdot 10^6$ m/s ja kuparin $1,57 \cdot 10^6$ m/s [17].



Kuva 2.7: SIS-liitoksen konduktanssi jännitteen funktiona.

2.4 Tunneliliitosten lämpökäsittely

Lämpökäsittelyllä, eli anniilauksella, pyritään stabiloimaan tunneliliitos. Korkeassa lämpötilassa oksidikerroksen atomit pääsevät liikkumaan vapaammin. Hitaan jäähtymisen aikana atomit ehtivät uudelleenjärjestäytyä tasapainotilojen kautta energeettisesti edullisimpaan järjestykseen. Jäähdyttyään takaisin huoneenlämpöön, oksidikerros on saavuttanut energeettisesti edullisimman rakenteen, joka on stabiili.

FGA-menetelmällä (Forming Gas Annealing) tehdyssä kokeissa on havaittu Al-AlO_x-Al -liitosten tunneloitumisresistanssin laskevan käytettäessä 200°C anniilaukslämpötilaa ja kasvavan käytettäessä 400°C anniilaukslämpötilaa [18]. Tällöin anniilauksaika vaikutti muutoksen suuruuteen. Toisessa FGA-kokeessa havaittiin kuitenkin Nb-Al-AlO_x-Al -liitoksen resistanssin kasvavan käytettäessä 200°C lämpötilaa [19]. RTA-menetelmää (Rapid Thermal Annealing) käyttäen Nb-Al-AlO_x-Al -liitoksille on havaittu potentiaalivallin korkeuden kasvavan ja tunneloitumiskonduktanssin laskevan merkittävästi, käytettäessä 300°C tai korkeampaa anniilaukslämpötilaa [20].

Tässä työssä käytetty anniilauksmenetelmä on tyhjiöanniilauks, jossa sekä lämmitys että jäähtymys tehdään tyhjiössä, jolloin ympäröivästä kaasukehästä ei siirry mitään ainetta näytteeseen missään lämpökäsittelyprosessin vaiheessa.

Vaikka lähteessä [19] ei havaittu eroa tyypikehässä ja ilmakehässä tehdyissä lämpökäsittelyissä, ei kaasukehän vaikutusta lämpökäsittelyprosessiin tunneta. Tästä syystä on varmintä tehdä prosessi ilman ympäröivää kaasukehää, jolloin tutkimuksessa on yksi tuntematon muuttuja vähemmän. Toinen syy tyhjiöanniilauksen käyttöön on, että sitä ei ole tutkittu. Tyhjiöanniilaukskoikeita on tehty magneettisille tunneliliitoksille, joissa havaittiin potentiaalivallin korkeuden kasvaneen [21], mutta ei normaaleille tunneliliitoksille.

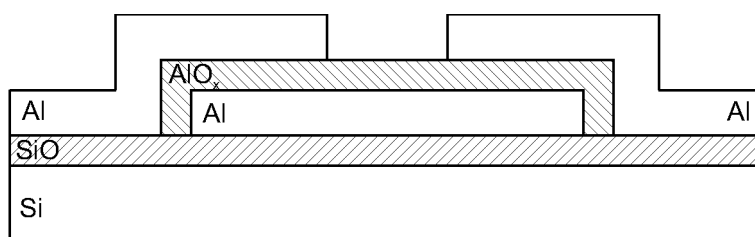
Tässä työssä esitetyn lämpökäsittelymetodin seurauksena Al-AlO_x-Al -liitosten potentiaalivallin leveys ja korkeus kasvaa [22]. Lisäksi liitosten jänniteriippuvuus muuttuu, sillä riippuvuus ei ole niin voimakas lämpökäsittelyn jälkeen kuin se oli ennen. Myös jänniteriippuvuuden resonanssiipikit häviävät.

Luku 3

Kokeelliset menetelmät

3.1 Näytteenvalmistus

Mittauksia varten valmistettiin elektronisuihkulitografialla ja tyhjiöhöyrystyksellä Al-AlO_x-Al -tunneliliitosnäytteitä (kuva 3.1), joissa on kaksi tunneliliitosta sarjassa sekä hilaelektrodi. Näitä rakenteita kutsutaan yhden elektronin transistoreiksi (SET). Suprajohtavia liitoksia tutkittaessa käytettiin samaan tapaan valmistettuja yhden liitoksen näytteitä, joiden valmistuksessa käytettiin samoja parametreja kuin SET:n valmistuksessa, joten jatkossa yksinkertaisuuden vuoksi puhutaan vain SET:n valmistuksesta.



Kuva 3.1: Poikkileikkaus SET:stä, missä on sarjassa kaksi Al-AlO_x-Al -tunneliliitosta.

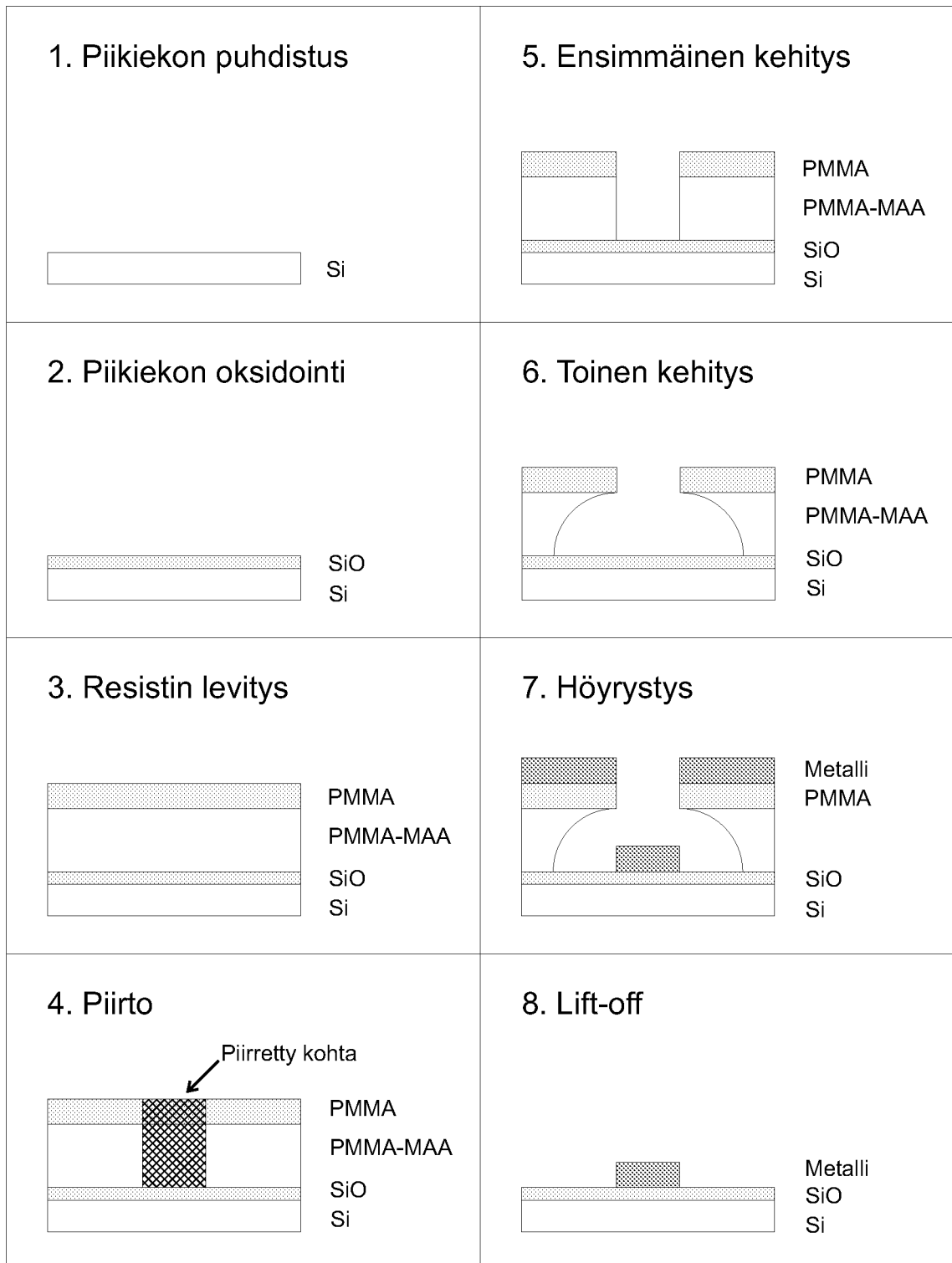
3.1.1 Elektronisuihkulitografia ja tyhjiöhöyrystys

Elektronisuihkulitografia on prosessi, jossa elektronisuihkumikroskoopilla (Scanning Electron Microscope, SEM) piirretään kuva elektronisuihkulle herkkään polymeerikalvoon. Tämän kuvan mukainen kuvio höyrystetään substraatin pinnalle tyhjiöhöyrystimellä. Kuvassa 3.2 on esitetty näytteenvalmistuksen kahdeksan työvaihetta. Seuraavassa tarkastellaan tarkemmin miten suoritettiin prosessin eri työvaiheet, joiden numerointi vastaa kuvan 3.2 vaiheita.

Ensimmäiseksi piikiekkko puhdistettiin mahdollisimman hyvin hankaamalla kiekon pintaa pumpulipuikoilla lämpimässä asetonissa sekä käyttäen ultraäänipesuria (vaihe 1). Pesun jälkeen asetoni huuhdottiin kiekon pinnasta isopropanolilla (IPA). Puhdistetun piikiekkon pinta oksidoitiin joko termisesti tai käyttäen CVD:tä (Chemical Vapour Deposition). Termisessä oksidoinnissa piikiekkko oli uunissa, jonka lämpötila oli 1100°C, 3-4 tunnin ajan puhtaassa happivirtauksessa, jolloin piikiekkon pinta oksidoitui noin 300 nm syvyydelle. Vaihtoehtoinen tapa oli kasvattaa oksidikerros piikiekkon pintaan CVD:llä, jolloin kiekko laitettiin CVD:n kammioon, johon pumpattiin tyhjiö. Tämän jälkeen piikiekkon pintaan kasvatettiin 200nm kerros piioksidia silaanin (SiH_4) ja ilokaasun (N_2O) reaktiotuloksena.

Ennen resistin levitystä (vaihe 3) oksidoitu pii leikattiin sopivan pieniin palasiin, jotka putsattiin samoin kuin ennen oksidointia. Palasten päälle levitettiin kaksikerrosresisti resistinlevityslingolla. Alemmaksi kerrokseksi levitettiin 9% etikkahappoon liuotettua PMMA-MAA -resistiä, jonka levityksessä käytettiin lingon kierrosnopeutena 6000 kierrosta minuutissa, jolloin resistikerroksen paksuudeksi tuli 300 nm. Seuraavaksi liuotin haihdutettiin pois paistamalla näyte noin 160°C lämpöisen levyn päällä 45 minuutin ajan. Ylemmäksi kerrokseksi levitettiin 3% klooribentseeniin liuotettua PMMA -resistiä, kierrosnopeutena 3000 kierrosta minuutissa, jolloin resistin paksuudeksi tuli 275 nm. Jälkimmäisen kerroksen paistoaika oli 60 minuuttia.

Joissakin näytteissä käytettiin alempana resistinä 500 nm paksua kerrosta 11% etikkahappoon liuotettua PMMA-MAA:ta (4000 kierrosta minuutissa) ja ylempänä 2% klooribentseeniin liuotettua PMMA:ta (3000 kierrosta minuutissa), jota levitettiin kaksi kerrosta, jolloin ylemmän resistikerroksen paksuudeksi tuli noin 250 nm.



Kuva 3.2: Näytteenvalmistuksen vaiheet.

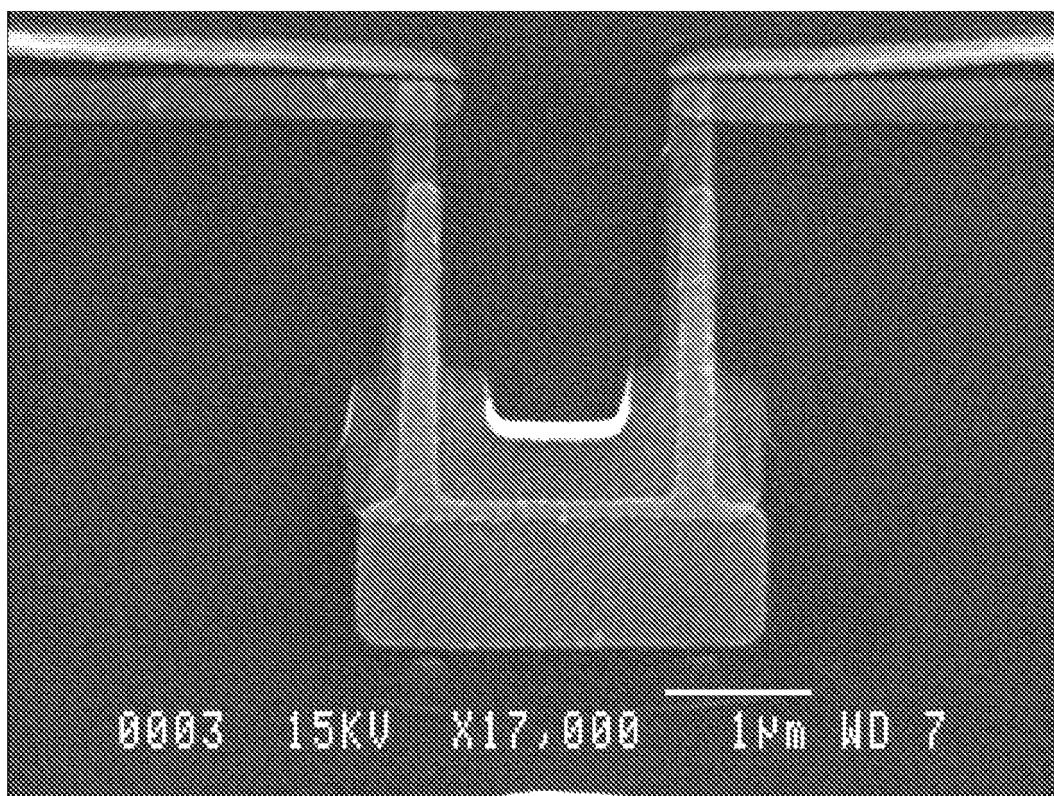
Jokaista kerrosta paistettiin yksi minuutti 160 °C lämpöisellä levyllä. Molemmille resistivaihtoehdolle toimivat samat piirto-, kehitys- ja höyrystysparametrit.

Elektronimikroskoopilla (JEOL 840) piirrettiin elektronisuihkulla resistiin haluttu kuva (vaihe 4) käyttäen 40 kV kiihdytysjännitettä. Piirron aikana elektronisuihku rikkoi polymeeriketjuja osumakohdaltaan. Osa elektronisuihkuun elektroneista meni resistin läpi, jolloin ne kimposivat piin pinnasta katkoen lisää polymeeriketjuja, joten resisti valottui voimakkaammin piin pinnan läheisyydestä.

Valotettu kuva kehitettiin kahdella eri kehitteellä. Näytettä pidettiin 45 sekuntia ensimmäisessä kehitteessä (metyyli-isobutyryli-ketonia ja isopropanolia suhteessa 1:2), joka liuotti molempia resistikerroksia (vaihe 5). Toisessa kehitteessä (metyyliglykolia ja metanolia suhteessa 1:2) näytettä pidettiin 5-7 sekuntia. Toinen kehite ei juurikaan liuottanut päällimmäistä kerrosta, mutta liuotti tehokkaasti alemmaa kerrosta (vaihe 6). Näin päällimmäisen kerroksen alle jäi tyhjää tilaa, jota kutsutaan undercut:ksi. Kehityksen tulos tarkastettiin valomikroskoopilla, jolla silmämääräisesti tarkastettiin oliko piirto ja kehitys onnistunut.

Kehityksen jälkeen näyte puhdistettiin happiplasmalla Oxford Plasmalab 80 Plus RIE:llä (Reactive Ion Etcher), käyttäen 20 W tai 40 W tehoa (paine 40 mtorr, virtaus 50 sccm). Tällä tavoin alustan, eli oksidoidun piin, pinta saatiin puhdistettua isosta osasta orgaanisista epäpuhtauksista, kuten resistin jäämistä. Puhdistuksen tärkeys käy ilmi lähteestä [14], jossa havaittiin plasmapuhdistuksen selvästi hidastavan tunneliliitosten ikääntymistä verrattuna näytteisiin, joita ei oltu puhdistettu.

Putsattu näyte siirrettiin RIE:n kammioista höyrystimen (Balzers BAE 250 T) kammioon. Aika jonka näyte oli huoneilmassa RIE-puhdistuksen jälkeen pyrittiin minimoimaan, jotta näytteen päälle ei tulisi uusia epäpuhtauksia. Substraatin päälle höyrystettiin (vaihe 7) kolme kerrosta metallia. Ensin höyrystettiin SET:n saareke höyrystämällä substraatin päälle alumiinia 60° kulmasta. Saarekkeen pinta oksidoitiin päästämällä höyrystyskammioon puhdasta happea. Happipaineen valinnalla voitiin säätää muodostuvan alumiinioksidikerroksen paksuutta, jolla puolestaan voitiin säätää tunneliliitosnäytteiden vastuksia. Oksidointipaine valittiin väliltä 0,25-0,4 mbar ja oksidointiaika oli 5 minuuttia. Toinen alumiinikerros höyrystettiin 0°



Kuva 3.3: SEM-kuva SET-näytteestä. Kuvassa näkyy kaksi saarekettä, joista ylempi on varsinainen saareke, joka muodostaa tunneliliitokset vaakatasossa olevien johtimien kanssa kuvan yläreunassa.

kulmasta, jolla saatiin tehtyä liitosten toinen kerros sekä johtimet kontaktialustoille. Kolmanneksi kerrokseksi substraatin päälle höyrystettiin kuparia suuresta kulmasta (-80°), jolloin kuparia tuli ainoastaan kontaktialustojen päälle, mutta ei liitoskohaan. Kuparikerros näytteen kontaktialustan pinnassa oli helpottamassa kontaktien tekoa, sillä ultraäänibonderilla oli vaikea saada hyvää kontaktia alumiinin pintaan. Lopuksi näyte jälkioksidoitiin, päästämällä kammioon happea noin 0,5 mbar.

Höyrystyksen jälkeen näyte laitettiin asetoniin, jossa resisti liukeni pois (vaihe 8, lift-off), jolloin myös resistin päällä ollut metallikalvo irtosi. Tällöin näytteelle jää ainoastaan piioksidin pintaan tarttunut metalli, jolloin näyte oli valmis. SEM-kuva valmiin näytteen liitoskohdasta on esitetty kuvassa 3.3.

Valmiin näytteen toimivuus testattiin yleismittarilla. Toimiviin näytteisiin tehtiin ultraäänibonderilla kontaktit näytteen kontaktialustoilta näytealustan kontak-

tialustaan.

3.2 Lämpökäsittelyprosessi

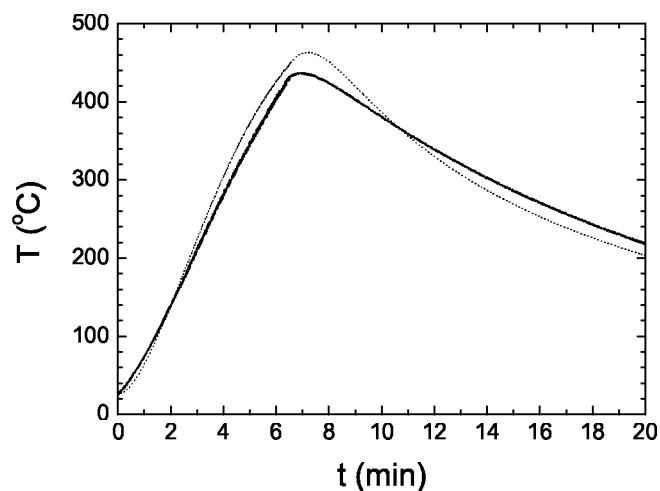
Lämpökäsittely suoritettiin anniilauusuunissa, jonka rakenne on kuvattu tarkemmin lähteessä [14], jonka jälkeen ainoa uuniin tehty muutos on näytealustan lämpötilan mittaamiseen käytetyn termoparin korvaaminen platinavastuksella, jonka resistanssi on riippuvainen lämpötilasta. Tarkat ohjeet anniilauusuunin käyttöön on esitetty lähteessä [14], joten tässä esitetään vain pääkohdat.

Ensimmäisenä toimenpiteenä aloitettiin kammion pumppaus ja laitettiin näyte kammion sisälle. Näytteen lämpötilan mittaus aloitettiin tässä vaiheessa. Diffuusio-pumpun lämmentyä oltiin saavutettu riittävän hyvä tyhjiötaso ($P < 1$ mTorr), jotta varsinainen lämpökäsittely voitiin aloittaa.

Ennen lämmityksen aloittamista näyte vedettiin latauskammioon, jossa se oli mahdollisimman kaukana lämmityselementistä. Porttiventtiilin luukkua käytettiin säteilysuojana sulkemalla venttiiliä hieman. Uuni lämmitettiin lämpötilaan 600°C , jolloin näyte työnnettiin uuniin. Näytteen saavutettua tavoitelämpötilan 450°C , se vedettiin pois uunista ja lämmitys kytkettiin pois päältä. Näyte jäähdyi tyhjiössä noin 40°C lämpötilaan, jolloin se suljettiin latauskammioon, joka ilmattiin huoneenlämpöisellä typpikaasulla. Lopuksi lämpötilan mittaus lopetettiin ja pumput sammutettiin. Kuvassa 3.4 on esimerkki tyypillisestä lämpötilakäyrästä anniilauusprosessin aikana.

3.2.1 Lämpötilan mittauksen ongelmia

Koska lämmityselementti toimii tyhjiössä säteilyn avulla, se aiheutti lieviä ongelmia lämpötilan mittaamiseen, johon käytettiin kahta eri menetelmää. Aluksi lämpötilaa mitattiin käyttäen termoparia, jonka mittapää oli puristettu ruuvilla kiinni näytealustaan. Myöhemmin termopari korvattiin platinavastuksella, jota mitaustapaa käytettiin tämän työn mittauksissa. Näillä kahdella menetelmällä saatiin lämpötilalle hieman eri arvot (ks. kuva 3.4).



Kuva 3.4: Esimerkki tyypillisestä lämpötiläkäyrästä anniilausprosessin aikana. Katkoviiva on platinavastuksella mitattu lämpötila ja yhtenäinen viiva termoparilla mitattu. Kuvassa esitetty prosessin 20 ensimmäistä minuuttia, jolloin erot mittausastepojen välillä ovat suurimmillaan.

Koska termoparin mittapää oli kiinni näytealustan pinnassa, se mittasi näytealustan pinnan lämpötilaa, jossa myös näyte sijaitsi. Ongelmaksi muodostui termoparin suojasukkien nopea haurastuminen korkeissa lämpötiloissa. Haurastunut suojasukka halkeili eikä toiminut enää sähköisenä eristeenä, jolloin termoparin langat saattoivat olla kontaktissa myös muualla kuin näytealustan pinnassa. Lisäksi haurastuvasta suojasukasta irtosi epäpuhtauksia tyhjiökammioon.

Platinavastus sijaitsi näytealustan sisällä, jolloin se oli suojassa lämmityselementin suoralta lämpösäteilyltä. Suuren lämpötilagradientin vuoksi platinavastuksella ei kuitenkaan pystytty mittaamaan tarkasti näytteen lämpötilaa nopean lämmityksen aikana. Huolimatta kuparin hyvästä lämmönjohtokyvystä, sillä oli silti lämpökapasiteetti, jolloin kuparin lämpenemiseen kului aikaa, joten lämpötila ei ollut sama näytealustan pinnalla ja sen sisällä. Platinavastuksen mittaustarkkuus oli kuitenkin erittäin hyvä, sillä sen vastus mitattiin nelilankamenetelmällä. Koska vastuksessa ei ollut mitään korkeassa lämpötilassa haurastuvia

materiaaleja, oli sen käyttöikä huomattavasti pidempi termopariin nähden, eikä sen käyttö liannut tyhjiökammiota.

Vaikka termoparilla saatiin mitattua näytteen lämpötilaa tarkemmin, lyhyestä käyttöiästä johtuen sen käyttö ei ollut käytännöllistä. Mittaamalla lämpötilaa molemmilla tavoilla eri lämpötiloissa ja lämmitysnopeuksilla, voidaan tätä kalibraatiota käyttäen platinavastuksella mitatusta lämpötilasta laskea pinnan lämpötila.

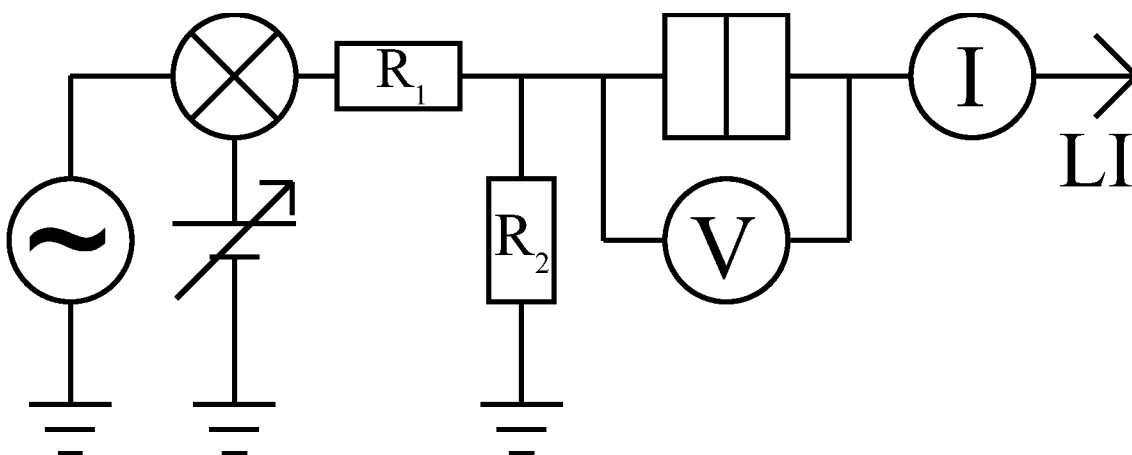
3.3 Matalan lämpötilan mittaukset

Varautumisilmiöitä tutkittaessa varautumisenergian on oltava suurempi kuin termiset fluktuaatiot $|10|$, eli $E_C > k_B T$. Normaalitilaisten liitosten mittaukset suoritettiin nestemäisen helilumin lämpötilassa (4,2 K) ja suprajohtavassa tilassa olevien liitosten mittaukset $^3\text{He}/^4\text{He}$ laimennuskryostaatissa noin 60 mK lämpötilassa.

Kun tunneliliitosnäyte jäähdytettiin huoneenlämmöstä nestemäisen heliumin lämpötilaan, havaittiin näytteen resistanssin kasvaneen. Tämä havainto varmisti, että liitokset olivat toimivia tunneliliitoksia. Mikäli resistanssi olisi pienentynyt, virta kulkisi liitoksen läpi mahdollisesti johtumalla.

Normaalitilaisten liitosten konduktanssi jännitteen funktiona mitattiin (kytkentäkaavio kuvassa 3.5) viemällä näytteelle hitaasti muuttuva DC-jännite, johon summattiin lukitusvahvistimen AC-eksitaatiojännite. DC-jännitepyyhkäisyjä varten käytössä jännitelähde, joka antoi hitaalla tasaisella nopeudella muuttuvaa jännitettä välillä $-4\text{V} \rightarrow +4\text{V}$. Tämä jännite muutettiin halutun suuruiseksi sopivalla jännitteenjaolla.

Differentiaalisesti mitattu jännite sekä lukitusvahvistimella mitattu differentiaalikonduktanssi tallennettiin pistepareina tietokoneelle. Jännite vahvistettiin ennen mittaamista jännitevahvistimella (Ithaco 1201 Low Noise Preamplifier). Virta vahvistettiin ja muutettiin jännitteeksi virtavahvistimella (Ithaco 1211 Current Preamplifier) ennen viemistä lukitusvahvistimelle. Vahvistimien asetukset kirjattiin muistiin, jolloin jännitteen ja konduktanssin todelliset arvot voitiin laskea myöhemmin.



Kuva 3.5: Käytetty kytkentäkaavio mitattaessa konduktanssia jännitteen funktiona. R_1 ja R_2 ovat jännitteenjaossa käytetyt vastukset ja LI kuvaa lukitusvahvistinta.

Suprajohtavassa tilassa olevien liitosten konduktanssi jännitteen funktiona mitattiin kuten normaalitilaistenkin. Virta-jännite-riippuvuus mitattiin tekemällä DC-jännitepyyhkäisyjä ja mittaamalla näytteen läpi kulkevaa virtaa.

Mittaukset suoritettiin elektromagneettisesti suojatussa huoneessa, jolloin ympäristöstä tuleva elektromagneettinen säteily ei vaikuttanut mittauksiin. Sähköverkosta tulevan kohinan minimoimiseksi jännite- ja virtavahvistimet saivat käyttöjännitteensä mittausten aikana paristosta ja jännitepyyhkäisyä suorittava laite 24V akusta. Kaikki mittalaitteet, näytealusta, heliumsäiliö ja huoneen seinät oli maadoitettu samaan pisteeseen.

Luku 4

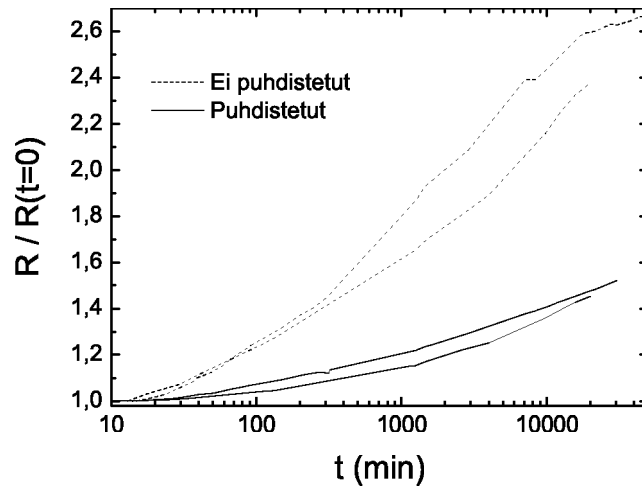
Mittaukset

4.1 Huoneenlämpötilamittaukset

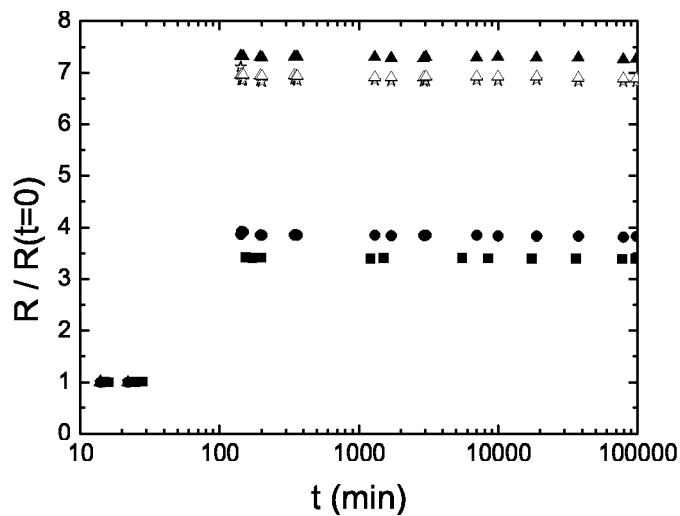
Ikääntymistä ja lämpöskäsittelyn vaikutusta liitosten stabiilisuuteen on käsitelty tarkemmin viitteessä [5], joten tässä tehdään vain yhteenveto aikaisemmista tuloksista. Tunneliliitosten ikääntymistä sekä lämpöskäsittelyn vaikutusta ikääntymiseen tutkittiin mittaamalla resistanssia ajan funktiona. Onnistuimme hidastamaan ikääntymistä puhdistamalla näytteet happiplasmalla ennen höyrystystä, mutta silti liitokset eivät täysin stabiloituneet edes yli kuukauden kestäneen tarkkailujakson aikana (ks. kuva 4.1). Lämpökäsittelmällä liitos vähintään 350°C lämpötilassa, ikääntyminen saatiin pysäytettyä (ks. kuva 4.2).

Aluksi lämpötilaa mitattiin termoparilla, jolloin anniilauslämpötiloina käytettiin 350°C ja 400°C. Yhteensä 69 näytettä 16 eri piikiekolla lämpökäsiteltiin, joista vastus laski ainoastaan 11 näytteellä kolmella eri kiekolla. Muissa näytteissä vastus nousi.

Vapaa matka, NIN- ja SIS-näytteissä lämpötilan mittaamiseen käytettiin platinavastusta ja anniilauslämpötilana 425-450°C, joka havaittiin riittävän isoksi pysäyttämään ikääntyminen. Näissä lämpötiloissa lämpökäsiteltiin 61 näytettä 14 eri piikiekolla, joiden kaikkien vastus nousi.



Kuva 4.1: *Happiplasmalla puhdistettujen näytteiden (katkoviiva) ikääntyminen verrattuna puhdistamattomiin näytteisiin (yhtenäinen viiva).*



Kuva 4.2: *Lämpökäsiteltyjen näytteiden stabiloituminen.*

4.2 SINIS-näytteet

Neljä piikiekkoa, joilla oli SINIS-näytteitä (suprajohtena alumiini ja normaalimetallina kupari), lämpökäsiteltiin lämpötiloissa 200°C, 300°C, 400°C ja 450°C (ks. tau-

Piikiekkko	Näyte	Anniilau斯拉mpötila [°C]	R_{ennen} [k Ω]	$\Delta R/R_{ennen}$
1	4 näytettä	450		∞
2	5 näytettä	400		0
3	A	200	26,6	1622
3	B	200	24,6	34
3	C	200	24,7	19
4	A	300	24,4	54
4	B	300	31	72
4	C	300	28,4	4
4	D	300	62,5	1316

Taulukko 4.1: *SINIS*-näytteiden resistanssin muutokset, missä $\Delta R = R_{jälkeen} - R_{ennen}$.

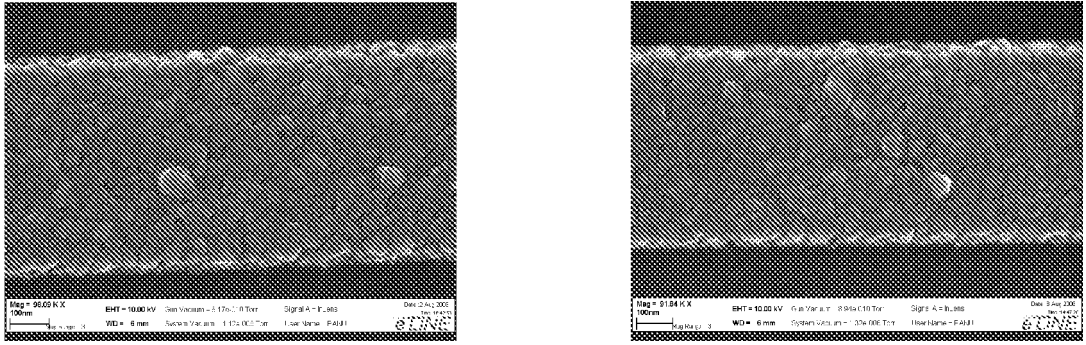
lukko 4.1). Anniilau斯拉mpötilan ollessa 200°C ja 300°C, näytteiden vastukset nousivat anniilauksessa 4-1700%. Näytteitä ei kuitenkaan seurattu anniilauksen jälkeen, joten ei tiedetä stabiloituivatko ne. 400°C ja 450°C anniilau斯拉mpötiloja käytettäessä näytteet hajosivat.

4.3 Vapaa matka

Elektronin vapaa matka (mfp, mean free path) alumiinifilmissä mitattiin ennen ja jälkeen anniilauksen, kun anniilau斯拉mpötila oli 450 °C. Tällä mittauksella voitiin varmistaa, ettei anniilauksella muuta alumiinifilmin johtavuutta huonommaksi. Mitatut näytteet olivat noin 500 μm pitkiä ja 50 nm paksuja alumiinilankoja.

Ensimmäisenä tarkasteltiin silmämääräisesti pinnan rakenteen muuttumista anniilauksessa. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla filmistä otetuista kuvista ei havaita suuria muutoksia filmin pinnan granulaarisuudessa (kuva 4.3).

Tarkemmin vapaan matkan muutosta tutkittiin mittaamalla alumiinilangan vastus nestemäisen heliumin lämpötilassa ennen ja jälkeen anniilauksen. Vaikka kuvien perusteella anniilauksen aikana ei tapahtunut mitään ulkoisia muutoksia filmin laa-



Kuva 4.3: Vasemmassa kuvassa SEM-kuva alumiinifilmistä ennen anniilauusta ja oikeassa anniilauksen jälkeen.

dussa, vapaa matka kasvoi (taulukko 4.2). Vapaan matkan kasvusta seuraa filmin johtavuuden kasvu. Koska tunneliliitosten johtimien johtavuus kasvaa, eli vastus pienenee, voimme päätellä anniilauksen aikana tapahtuvan näytteen resistanssin kasvun johtuvan ainoastaan eristekerroksen muutoksista.

Näyte	$\Delta R/R_{ennen}$ [%]	$\Delta mfp/mfp_{ennen}$ [%]
A	-34,7	53,0
B	-39,4	64,9

Taulukko 4.2: Alumiinilangan vastuksen ja elektronin vapaan matkan muutos anniilausprosessissa.

4.4 NIN-liitokset

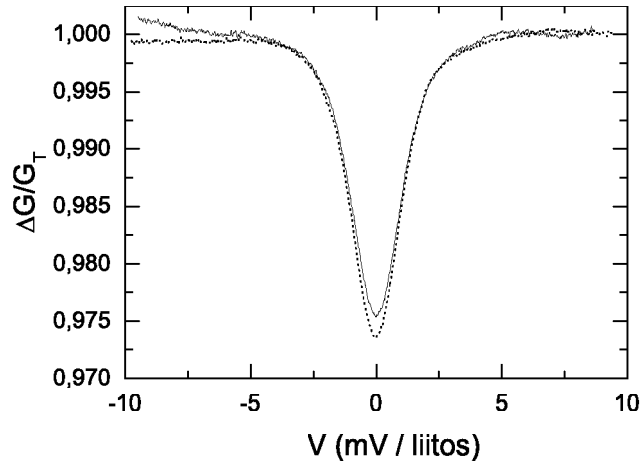
Normaalitilaisista tunneliliitoksista mitattiin konduktanssi jännitteen funktiona ennen ja jälkeen anniilauksen. Tulokset mitatuista kymmenestä näytteestä on esitetty taulukossa 4.3.

Varautumisenergia on määrätty mittaamalla Coulombin saannon piikin korkeus [11]. Esimerkki piikin korkeuden muuttumisesta on esitetty kuvassa 4.4.

Mittaustuloksista voidaan laskea kunkin näytteen kohdalla tarkka arvo varautumisenergian muutokselle, joista havaittiin varautumisenergian kasvavan keskimäärin 5-10%. Liitoskapasitanssin, joka on kääntäen verrannollinen varautumisenergiaan,

Näyte	Liitos-ala [μm^2]	ΔE_C [%]	ΔC [%]	ΔG_T [%]
1	0,124	10,53	-9,52	-68,01
2	0,136	15,69	-13,56	-17,44
3	0,186	-14,67	17,19	5,66
4	0,145	-2,04	2,08	-26,20
5	0,267	22,22	-18,18	-57,48
6 A	0,0432	1,04	-1,03	-46,69
6 B	0,0537	4,62	-4,41	-42,47
7 A	0,056	6,56	-6,15	-46,77
7 B	0,0572	5,41	-5,13	-52,61
8	0,100	3,39	-3,28	-10,90

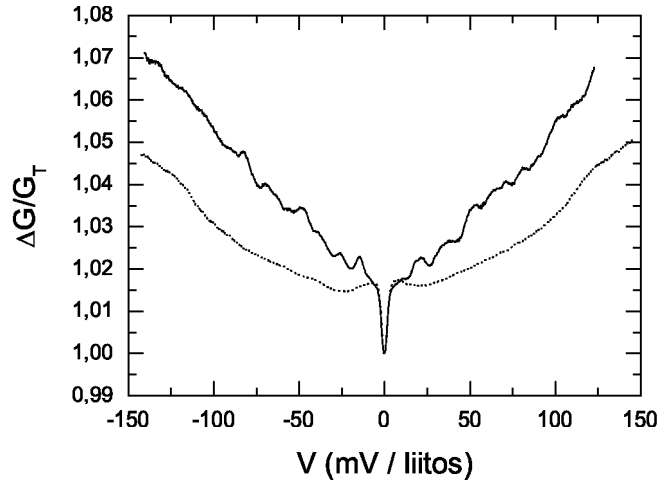
Taulukko 4.3: Liitosten pinta-alat sekä varautumisenergian, kapasitanssin ja tunneloitumiskonduktanssin suhteelliset muutokset.



Kuva 4.4: Esimerkki Coulombin saarrosta ennen (yhtenäinen viiva) ja jälkeen (katkoviiva) anniilauksen.

havaitaan pienenevän 5-10% anniilauksprosessissa. Näytteessä 3 tapahtunutta varautumisenergian laskua ei tässä vaiheessa osata selittää.

Kuvasta 4.5 nähdään jänniteriippuvuuden muuttuminen lämpökäsittelyn



Kuva 4.5: *Esimerkki jänniteriippuvuuden paranemisesta ennen (yhtenäinen viiva) ja jälkeen (katkoviiva) anniilauksen.*

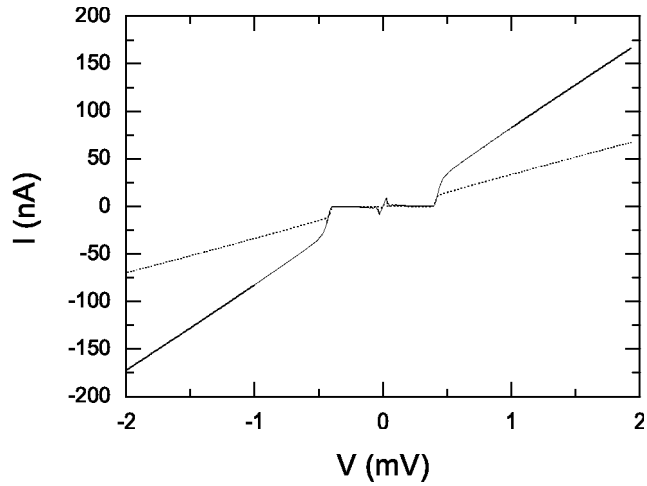
seurauksena. Ennen lämpökäsittelyä havaitut resonanssiipiikit häviävät ja jänniteriippuvuus on lähempänä teorian ennustamaa V^2 riippuvuutta [15].

4.5 SIS-liitokset

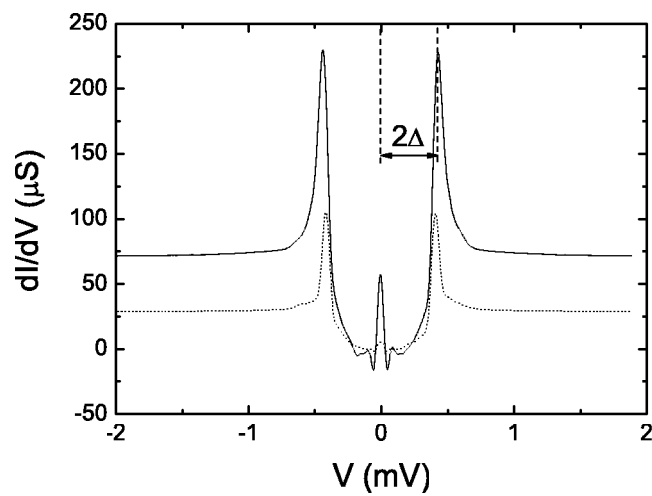
Mittasimme suprajohtavassa tilassa olevien yksittäisten liitosten konduktanssin jännitteen funktiona, josta määritettiin energia-aukon (Δ) leveys. Mittasimme myös virta-jännite riippuvuuden, josta määritettiin tunnelointiresistanssi. Tulokset on esitetty taulukossa 4.4.

Yhtä näytettä lukuunottamatta tunneloitumisvastus kasvoi anniilausprosessissa. Kunkin näytteen tunneloitumisvastuksen muutokselle voidaan laskea tarkka arvo, joista havaitaan vastuksen kasvavan 20-210%. Tunneloitumisvastus määritettiin mittaamalla virta-jännite käyrä, josta on esitetty esimerkki kuvassa 4.6.

Energia-aukko määritettiin konduktanssiinkin etäisyydestä nollajännitteeseen (ks. kuva 4.7). Energia-aukon muutokset olivat muutaman prosentin suuruusluokkaa, joka on mittaustarkkuuden rajoissa, joten voimme päätellä, että energia-aukko



Kuva 4.6: Esimerkki yksittäisen suprajohtavan liitoksen virta-jännite-riippuvuudesta. Lähellä nollajännitettä näkyy piikki, joka on supravirta.



Kuva 4.7: Esimerkki yksittäisen suprajohtavan liitoksen konduktanssista jännitteen funktiona.

ei muutu merkittävästi lämpökäsittelyllä. Esimerkki konduktanssista jännitteen funktiona on esitetty kuvassa 4.7.

Näyte	$\Delta R_T/R_{T,ennen}$ [%]	$\Delta_{muutos}/\Delta_{ennen}$ [%]
050823/1 JJ6	209,6	0,46
060221/2 JJ2	-18,5	3,03
060320/1 JJ5	19,7	1,94
060515/1 JJ2	95,3	-3,72
060515/1 JJ3	116,3	-3,24
060515/1 JJ5	163,7	-3,70
060515/1 JJ6	148,2	-4,61

Taulukko 4.4: *Suprajohtavien yksittäisten liitosten tunneleittumisvastuksen ja energia-aukon suhteelliset muutokset.*

Luku 5

Johtopäätökset

Al-AlO_x-Al -tunneliliitokset stabiloituvat täydellisesti lämpökäsittelyn vaikutuksesta, kun anniilaukslämpötila on 350°C tai korkeampi. Ilman lämpökäsittelyä liitosten ikääntyminen kestää useita kuukausia. Happiplasmapuhdistuksen havaittiin hidastavan ikääntymistä.

Lämpökäsittely parantaa alumiinifilmin johtavuutta ja kasvattaa tunneliliitosten tunnelloitumisresistanssia ja varautumisenergiaa. Samalla liitoksen jänniteriippuvuus paranee ja eristekerrosta kuvaavan potentiaaalivallin korkeus ja leveys kasvavat.

Lämpökäsittelyn liitoksen parametreihin aiheuttamia muutoksia ei voida ennustaa tarkasti. Ainoastaan muutosten suunnat voidaan ennustaa.

Lämpökäsittelyn vaikutuksista tunneliliitoksiin jää paljon avoimia kysymyksiä, joihin tämän työn puitteissa ei saatu vastausta. Anniilaukslämpötilan ja -ajan vaikutus liitoksessa tapahtuviin muutoksiin olisi hyödyllinen selvittää. Samoin lämmitys- ja jäähtymisaikojen vaikutus. Tässä työssä tutkittiin ainoastaan Al-AlO_x-Al -tunneliliitoksia sekä muutama alumiinista ja kuparista valmistettu SINIS-näyte, joiden muiden materiaalien käyttäytymisestä ei voida sanoa mitään.

Kirjallisuutta

- [1] Joshua Hihath Bingqian Xu, Peiming Zhang and Nongjian Tao. Study of single-nucleotide polymorphisms by means of electrical conductance measurements. *PNAS*, **102**, 16979 (2005).
- [2] K. Keren et al. Dna-templated carbon nanotube field-effect transistor. *Science*, **302**, 1380 (2003).
- [3] J. P. Kauppinen K. T. Loberg, A. J. Manninen and J. P. Pekola. Coulomb blockade thermometer: Tests and instrumentation. *Review of Scientific Instruments*, **69**, 4166 (1998).
- [4] Mikko Leivo. *On-chip cooling by quasiparticle tunneling below 1 kelvin*. PhD thesis, Department of Physics, University of Jyväskylä, (1999).
- [5] P. J. Koppinen L. M. Väistö and I. J. Maasilta. Effects of annealing to tunnel junction stability. *AIP Conf. Proc.*, **850**, 1639 (2005).
- [6] Anssi Lindell. *Nanofabrication by Atomic Force Microscopy, Electron Beam Lithography And Reactive Ion Etching*. PhD thesis, Department of Physics, University of Jyväskylä, (2000).
- [7] John G. Simmons. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film. *J. Appl. Phys.*, **34**, 1793 (1963).
- [8] Michael Tinkham. *Introduction to Superconductivity, 2nd ed.* McGraw-Hill Inc., (1996).

- [9] K. Gloos R. S. Poikolainen and J. P. Pekola. Wide-range thermometer based on the temperature-dependent conductance. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2915 (2000).
- [10] Hermann Grabert and Michel H. Devoret. *Single Charge Tunneling, Coulomb Blockade Phenomena In Nanostructures*. Plenum Press, New York, (1992).
- [11] J.P. Pekola K.P. Hirvi, J.P. Kauppinen and M.A. Paalanen. Thermometry by arrays of tunnel junctions. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 2903 (1994).
- [12] M. Nahum and John M. Martinis. Ultrasensitive-hot-electron microbolometer. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3075 (1993).
- [13] L. P. H. Jeurgens W. G. Sloof, F. D. Tichelaar and E. J. Mittemeijer. Growth kinetics and mechanisms of aluminum-oxide films formed. *J. Appl. Phys.*, **92**, 1649 (2002).
- [14] L. Väistö. *FYS 470 Erikoistyö: Lämpökäsittelyn vaikutus tunneliliitosten stabiilisuuten*. University of Jyväskylä, Department of Physics, (2005).
- [15] K Gloos P J Koppinen and J P Pekola. Properties on native ultrathin aluminium oxide tunnel barriers. *J.Phys.: Condens. Matter*, **15**, 1733 (2003).
- [16] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, (1996).
- [17] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/fermi.html>.
- [18] H. Scherer Th. Weimann, A. B. Zorin and J. Niemeyer. The effect of thermal annealing on the properties of Al-AlO_x-Al single electron tunneling transistors. *J. Appl. Phys.*, **90**, 2528 (2001).
- [19] T. Lehnert D. Billon, C. Grassl and K. H. Gundlach. Thermal annealing properties of Nb-Al-AlO_x-Nb tunnel junctions. *J. Appl. Phys.*, **72**, 3165 (1992).
- [20] E. Cimpoiasu et al. Aluminum oxide layers as possible components for layered tunnel barriers. *J. Appl. Phys.*, **96**, 1088 (2004).

- [21] Donkoun Lee and Jongill Hong. The redistribution of oxygen at AlO_x/CoFe interface of magnetic tunnel junctions through thermal treatment. *J. Appl. Phys.*, **97**, 093905 (2005).
- [22] P. J. Koppinen L. M. Väistö and I. J. Maasilta. Complete stabilization and improvement of the characteristic of tunnel junction due thermal annealing. Julkaisematon artikkeli.