

**Mikrokokoistetut leviämistä- ja
nelipisteanturimittaukset puolijohderakenteen
varauksenkuljettajien syvyysjakaumien määrittämisessä**

Mikko Pekka Konttinen

Pro gradu -tutkielma



Jyväskylän Yliopisto, Fysiikan laitos

Ohjaaja: Timo Sajavaara

7. tammikuuta 2014

Sisältö

Lyhenne- ja symboliluettelo	i
Tiivistelmä	iii
1 Johdanto	1
2 Puolijohteet ja puolijohderakenteet	3
2.1 Resisttiivisyys ja seostaminen	4
2.2 Rakenteiden perusteet	6
3 Mittausmenetelmät	10
3.1 Leviämistä vastustava mittaus, SRP	10
3.1.1 Leviämistä vastustava mittaus ja mittauksen perusperiaate	11
3.1.2 Kontaktivastus ja korjauskerroin	12
3.2 Nelipisteanturimittaus, 4PP	15
3.2.1 Neliövastus	16
3.2.2 Neliövastuksen mittaus	18
3.2.3 Nelipiste- ja kaksipistemittauksen yhteys	22
3.3 Syvyysjakauman mittaus	22
3.3.1 Perusperiaate ja viiste	23
3.3.2 Viistediffuusio ja -jakauma	25
3.3.3 Leviämistä vastustava mittauksen jakauma	29
3.3.4 Neliövastuksen mittauksen jakauma	30
3.4 Ionisuihkuanalyysitekniikka, SIMS	32
4 Mittaustuloksia	33
4.1 Näytteet	33
4.2 Laitteisto ja mittaussäätökäytännöt	35
4.2.1 M2PP- ja M4PP-laite	35
4.2.2 Mittausparametrit	36
4.2.3 Mittauksen suoritus	37
4.2.4 Viiste	39
4.2.5 SRP ja SIMS	39
4.3 Tulokset	40
4.3.1 Kalibraationäytteiden vastusjakauma ja M2PP-mittauksen kohina	40
4.3.2 Kalibraatiokäyrät	43
4.3.3 Implantointinäytteet: vastusjakaumat	45
4.3.4 Implantointinäytteet: varauksenkuljettajien jakaumat	49
5 Loppuyhteenveto	54
Viitteet	58

Lyhenne- ja symboliluettelo

4PP	Nelipisteanturimittaus
M2PP	Mikroskopinen kaksipisteanturimittaus / leviämistämittaus
M4PP	Mikroskopinen nelipisteanturimittaus
n-tyyppi / n	Puolijohde (seostettu), jossa enemmistövarauksenkuljettajat ovat elektroneita
p-tyyppi / p	Puolijohde (seostettu), jossa enemmistövarauksenkuljettajat ovat aukkoja
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry
SRP	Leviämistämittaus
	—
CF	Schumannin ja Gardnerin monikerrosmallin korjauskerroin SRP-mittauksissa
E	Sähkökenttä
e	(alaindeksi) Elektroni, varauksenkuljettaja
h	(alaindeksi) Aukko, varauksenkuljettaja
$h, \Delta h$	Syvyys ja/tai paksuus
I	Sähkövirta (A)
J	Sähkövirran tiheys (A/cm^2)
J_s	pn-liitoksen läpi vuotavan sähkövirran tiheys
J_0, J_1	Ensimmäisen lajin Besselin funktio
k	Kalibraatiokäyrän kulmakerroin log-log-asteikolla ($R_s(\rho) \propto \rho^k$)
K	Schumannin ja Gardnerin monikerrosmallin korjauskertoimen ydintermi
k_B	Boltzmannin vakio ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
L_D	(ulkoinen) Debye-pituus
n	Vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuus (elektroni/aukko, cm^{-3})
$n_e, n_e(h)$	Vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuus ja syvyysjakauma, elektroni

$n_h, n_h(h)$	Vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuus ja syvyysjakauma, aukko
n_s	Sisäinen vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuuden syvyysjakauma (ilman viistettä)
n_v	Viisteellä mitattu vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuuden syvyysjakauma
$N, N(h)$	Seostusatomien/epäpuhtauksien pitoisuus ja syvyysjakauma (cm^{-3})
N_a	Akseptori-atomien pitoisuus
N_d	Donori-atomien pitoisuus
$N_a^-, N_a^-(h)$	Sähköisesti aktivoitujen akseptori-atomien pitoisuus ja syvyysjakauma
$N_d^+, N_d^+(h)$	Sähköisesti aktivoitujen donori-atomien pitoisuus ja syvyysjakauma
N^\pm	Sähköisesti aktivoitujen seostusatomien pitoisuus, N_a^- tai N_d^+
q	Varauksenkuljettajan varaus
q_e	Alkeisvaraus ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$)
R_s	Leviämistä vastus (Ω)
R_{4PP}	4PP-mittauksen vastus (Ω , voi myös olla neliövastus)
R_\square	Neliövastus (Ω/\square)
R_c	Kontaktivastus (metallin ja puolijohteen välillä, Ω)
$r, r(\rho)$	SRP-anturin kontaktin säde ja sähköinen säde
s	4PP-, SRP-, M4PP- ja M2PP-mittausten antureiden kontaktien välinen etäisyys
T	Lämpötila
V	Jännite
	—
ϵ	Permittiivisyys
θ	Viistekulma
λ	Transitio-etäisyys 4PP- ja M4PP-mittauksissa
μ	Varauksenkuljettajien liikkuvuus (cm^2/Vs)
ρ	Resistiivisyys (Ωcm)
ψ	Potentiaali

Tiivistelmä

Entistä pienemmät puolijohderakenteet vaativat analyysityökaluilta erittäin hyvää herkkyyttä, jonka on myös kehityttävä rakenteiden vaatimusten mukaisesti – muussa tapauksessa kehitys voi hidastua hyvin paljon ilman kunnollista tietoa valmistusmenetelmien tuloksista. Yksi oleellinen osa rakenteiden analysoimisesta on tieto seostusatomien ja varauksenkuljettajien pitoisuuksista rakenteen syvyysuunnassa, eli syvyysjakauma. Vuosikymmeniä syvyysjakauman mittaukseen on käytetty leviämistä vastusta (SRP, engl. *Spreading Resistance Profiling*), ja nelipisteanturimittaukseen (4PP, engl. *Four Point Probe*) on käytetty kuvaamaan koko syvyysjakauman vaikutusta sähköisessä kontaktissa. Molempien tekniikoiden mittausherkkyydet ovat oleellisesti riippuvaisia antureiden koosta.

Tässä työssä verrataan mikrokokoistettujen SRP- ja 4PP-tekniikoiden – M2PP ja M4PP – tuloksia toisiinsa ja perinteiseen SRP-tekniikkaan. M4PP-anturi on niin pieni kooltaan, että myös sillä voidaan mitata syvyysjakauma. Viidestä erilaisesta, korkeasti seostetusta ja ohuesta germanium-puolijohderakenteesta mitattiin vastussyvyysjakaumat, jonka pohjalta osasta laskettiin myös varauksenkuljettajien syvyysjakaumat. M2PP-mittaukset olivat ensimmäisiä SRP-mittauksia käyttäen M4PP-anturia, ja ne sekä M4PP-mittaukset suoritettiin käyttäen Imec-tutkimuslaitoksen MicroRSP M-150 -mittauslaitetta (Capres A/S). M4PP-mittauksissa käytettiin 1,5- ja 10 µm-antureita, kun taas M2PP-mittauksissa ainoastaan 10 µm-anturia.

Mittaustulosten perusteella M2PP- ja M4PP-antureiden koolla on merkitystä. M2PP-mittauksissa esiintyvistä kohinaongelmista huolimatta mittaukset olivat huomattavasti herkempiä perinteiseen SRP-mittaukseen verrattuna. M4PP-tekniikalla saadut tulokset olivat samanlaisia kuin vastaavat SRP-tekniikan tulokset, mutta mittauksen suoritus ja sen analysointi olivat huomattavasti helpompia ja yksinkertaisempia suorittaa. Näiden lisäksi mittauksissa tuli esille viitteitä germaniumin pintatilojen tunnetusta ja suuresta merkityksestä. Pintatilojen vaikutus voi huomattavasti hankaloittaa analysointia molempien tekniikoiden tapauksessa.

1 Johdanto

Puolijohdeteollisuus on yksi maailman suurimmista teollisuuden osahaaroista. Elektromiikka perustuu suurilta osin siihen ja täyttää tämän päivän arkielämässä yhä suuremman ja suuremman osan. Maailmaa on viime vuosikymmenet juuritasolla mullistanut erityisesti puolijohdetransistorit, jotka Mooren lain mukaisesti ovat pienentyneet, tehostuneet ja samalla halventuneet jatkuvasti [1].

Jatkuva kehitys ei kuitenkaan olisi ollut mahdollista ilman tarkkaa tietoa puolijohderakenteiden sisäisestä toiminnasta, sekä sähköisellä että atomitasolla, mikä on välttämätöntä valmistusmenetelmien tutkimuksessa, kehityksessä ja lopulta myös laadun tarkastuksessa [1]. Sähköiset ominaisuudet vaikuttavat käytännössä itse puolijohdelaitteen toimintaan, mutta toisaalta eri seostusmenetelmät perustuvat sisäisen atomirakenteen muokkaamiseen, johon puolestaan sähköisten ominaisuuksien muodostuminen olennaisesti perustuu [2]. Rakenteiden monimutkaisuus ja erittäin pieni koko koettavat analysointimenetelmien rajoja jatkuvasti – usein analysointimenetelmien koon on myös pienennyttävä vastatakseen puolijohderakenteiden kutistumista. Yleisesti ottaen mitä pienempi koko on, sitä pienemmältä alalta tietoa voidaan saada.

Tässä työssä esitellään ja sovelletaan kahden perinteisen sähköisen analysointimenetelmän – leviämistä vastustava- (engl. *Spreading Resistance Profiling*, SRP) ja nelipisteanturimittaus (engl. *Four Point Probe*, 4PP) [3] – mikro- ja nanokokoistettuja versioita, ja mittaukset olivat osa puolivuotisen työharjoittelun sisältöä Imec-tutkimuslaitoksessa Belgiassa 1.9.2011–29.2.2012 välisenä aikana. SRP-tekniikkaa on perinteisesti käytetty näytteiden sähköisten ominaisuuksien, resistiivisyyden ja varauksenkuljettajien pitoisuuden, syvyysjakauman mittaukseen ja 4PP-mittausta puolestaan yleensä ainoastaan pintamittauksena [3]. Alun perin 4PP-tekniikkaa varten kehitetty ja valmistettu mikroskooppinen nelipisteanturimittaus (M4PP, Capres A/S [4]) on jo vuosien verran osoittanut hyvän tarkkuuden nykyaikaisien puolijohderakenteiden mittauksissa pienen kokonsa ja kontaktipaineen ansiosta [4,5], ja tämän työn yhteydessä M4PP-tekniikkaa sovellettiin myös syvyysmittaukseen ja ensimmäisen kerran kaksipistemittaukseen (M2PP [6]) eli SRP-tekniikkaan – erittäin lupaavin tuloksin ja entistä helpom-

malla tavalla. Perinteisiin mittausantureihin verrattuna M4PP- ja M2PP-antureiden teoreettiset mittausherkkyydet ovat jopa yli satakertaisesti parempia.

SRP- ja 4PP-analysointimenetelmillä ei kuitenkaan päästä käsiksi puolijohderakenteiden sisäiseen atomirakenteeseen. Atomirakennetta voidaan analysoida ionisuihkumenetelmin. SIMS (engl. *Secondary Ion Mass Spectrometry*) on ollut tässä tapauksessa puolijohdeteollisuuden työjuhtana vuosikymmeniä. Se on tärkeä mittaustekniikka, koska sillä saadaan tietoa puolijohdeiden sähkönjohtokykyyn vaikuttavien seosatomien pitoisuuksista, jotka eivät kuitenkaan aina ole samansuuruisia kuin varauksenkuljettajien pitoisuudet.

2 Puolijohteet ja puolijohderakenteet

Vaikka puolijohteiden valtaisa kehitys tapahtui pääosin 1900-luvun puolivälistä alkaen, niiden tarina alkoi kuitenkin jo 1800-luvulla kuuluisan luonnontieteilijän Michael Faradayn myötä. Vuonna 1833 Faraday julkaisi tutkimustuloksensa sähköisistä mittauksista hopeasulfidilla (Ag_2S): sen sähkönvastus pieneni lämpötilan kasvaessa – täysin päinvastoin kuin siihen asti oli todettu tapahtuman metallien tapauksessa. Puolijohteille on ominaista sähkönvastuksen selvä pieneneminen jo pienillä lämpötilan muutoksilla, mikä on seurausta niiden pienestä energia-aukosta. Fysikaalisesti pieni energia-aukko (alle 4 eV) erottaa puolijohteet eristeistä, metalleilla ei ole energia-aukkoa. Myös muut sovellusten kannalta tärkeät puolijohteiden ominaisuudet löydettiin 1800-luvun loppupuoliskolla: sähkömagneettisen säteilyn vaikutus johtavuuteen sekä tasasuuntaus. [2, 7]

Puolijohteiden menestyksen takana on kyky muokata niiden resistiivisyyttä, eli sähkönvastustuskykyä, huomattavalla skaalalla ja myös kyky vaikuttaa siihen aktiivisesti – resistiivisyys voidaan saada hyvin pieneksi, jopa metallien tasolle. [7] Perinteisesti resistiivisyyttä on muunneltu hyödyntämällä epäpuhtauksia puolijohdemateriaalin kiderakenteessa eli seostamalla, tai myös valmistamalla yhdistemateriaaleja (esim. GaAs ja muut III–V-materiaalit) [8]. Kahden hyvin tunnetun ja yleisesti käytetyn luonnollisen puolijohteen sähköisiä ominaisuuksia löytyy taulukosta 1, missä vertailun vuoksi on esitetty myös korkeasti seostettu germanium ja luonnollisesti erittäin hyvä sähkön-

Taulukko 1: Puolijohteiden pii (Si), germanium (Ge), korkeasti seostetun germaniumin (p-Ge) ja kupari-metallin (Cu) sähköisten ominaisuuksien vertailua ($T = 300\text{ K}$, e on elektroni ja h on aukko)

	Si	Ge	p-Ge	Cu
Resistiivisyys (Ωcm)	$2,5 \times 10^5$ [8]	46 ^a	1×10^{-4} [3]	$1,7 \times 10^{-6}$ [9]
Varauksenkuljettajien pitoisuus (cm^{-3})	$1,4 \times 10^{10}$ [8]	$2,4 \times 10^{13}$ [10]	1×10^{21} [3]	$8,5 \times 10^{22}$ ^b
Liikkuvuus e (cm^2/Vs)	1500 [8]	3800 [9]	-	43 ^a
Liikkuvuus h (cm^2/Vs)	475 [8]	1820 [9]	56 [11]	-

^a Laskettu yhtälön (2) ja tämän taulukon tiedoilla

^b Arvio jos jokainen kiderakenteen kupari-atomi luovuttaa ainoan valenssielektronin vapaaksi varauksenkuljettajaksi

johde kupari. Erityisesti pii on ollut puolijohdeteknologian perusaine, mutta nykyään germanium on tullut esille mahdollisena piin korvaajana eritoten tietokoneprosessorien transistoreissa germaniumin suuremman varauksenkuljettajien liikkuvuuden (ks. seuraava osio) ja siten paremman taaajuusvasteen ansiosta, joka mahdollistaisi nopeammat transistorit [12].

Puolijohdelaitteille on ollut myös hyvin olennaista niiden koon pieneneminen hurjalla vauhdilla. Puolijohderakenteita on pystytty valmistamaan hyvin pienille alueille ja hyvällä resoluutiolla – pienimmillään ne ovatkin nykyään muutaman kymmenen tai jopa vain muutaman nanometrin kokoluokkaa niin taso- kuin syvyysuuntaisesti. [1]

2.1 Resistiivisuus ja seostaminen

Yleisesti ottaen materiaalin sähkönvastustuskyky, eli resistiivisuus ρ , määrittää sähkökentän E aikaansaaman virrantiheyden J vastekertoimena:

$$\rho = \frac{E}{J},$$

kun sähkönjohtuminen on ohmista. Mitä suurempi on resistiivisuus, sitä pienempi sähkövirta saadaan samalla sähkökentän voimakkuudella, ja se on mm. aineesta riippuvainen. [13] Puolijohteilla resistiivisyydet ovat suuruusluokkaa 10^{-3} – $10^9 \Omega\text{cm}$ [2].

Ennen kaikkea, etenkin tämän työn kannalta, resistiivisyydellä päästään käsiksi varauksenkuljettajien pitoisuuteen. Resistiivisuus on luonnollisesti riippuvainen sähkönjohtamiseen tarvittavien vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuudesta n ja kuinka hyvin ne voivat liikkua materiaalissa, μ (liikkuvuus):

$$\rho = \frac{1}{qn\mu}, \tag{1}$$

missä q on yksittäisen varauksenkuljettajan varaus. Liikkuvuuteen vaikuttavat epäpuhtaudet ja kaikkien atomien (lämpö)liike, ja liikkuvuus vaikuttaa erityisesti laitteiden taaajuusvasteeseen. [3] Käytännössä liikkuvuus on empiirinen arvo, joka voidaan katsoa standardoiduista $\mu(N)$ arvoista, missä N on epäpuhtauksien kokonaispitoisuus [14].

Liikkuvuus on riippuvainen myös sähkökentän voimakkuudesta tarpeeksi suurilla voimakkuuksilla [2] ja voidaan mitata mm. suoraan yhtälöä (1) käyttäen, jos resistiivisyys ja kuljettajien pitoisuus ovat tiedossa tai Hall-ilmiötä käyttäen. [3]

Puolijosteissa on kuitenkin kahdenlaisia varauksenkuljettajia, elektronit ja aukot. Aukot ovat yksinkertaisesti sanottuna tyhjiä elektronien miehitystiloja kiderakenteen energiavyöteoriassa. Tästä syystä aukkoja voidaan pitää sähkönvaraukseltaan positiivisena; ne kulkevat vastakkaiseen suuntaan kuin elektronit saman sähkökentän vaikutuksesta, sillä elektronit liikkuvat tyhjiin miehitystilojen kautta toiseen suuntaan. Elektronit ja aukot eivät kuitenkaan ole yhtä liikkuvaisia, ja puolijosteiden resistiivisyys voidaan ilmaista yhtälöä (1) mukaillen muodossa

$$\rho = \frac{1}{q_e(n_e\mu_e + n_h\mu_h)}, \quad (2)$$

missä q_e on alkeisvaraus ja indeksit e ja h viittaavat elektroneihin ja aukkoihin. [2] Eri varauksenkuljettajatyypin yhteisvaikutuksen takia ainakaan tämän työn sähköisillä mittausten menetelmillä ei itse asiassa voida erottaa eri varauksenkuljettajia toisistaan, ja mittausten tuloksena saadaan ratkaistuksi varauksenkuljettajien nettopitoisuus. Toisaalta puolijohderakenteiden aktiivisessa osassa toista kuljettajatyypistä on yleensä ylimäärin toisen suhteen, ja siten toisen kuljettajan vaikutus voidaan jättää huomioimatta ja resistiivisyys voidaan laskea yhtälöstä (1). Materiaalin eri kuljettajatyypit voidaan tunnistaa Hall-ilmiöllä ja niiden pitoisuuksia voidaan mitata myös suoraan muilla mittausten menetelmillä käyttäen mm. sähkömagneettista säteilyä [3].

Yhtälöstä (2) voidaan huomata, että resistiivisyys pienenee, jos vapaiden varauksenkuljettajien määrää lisätään. Juuri näin puolijohdeteknologiassa tehdään seostamalla puolijohdemateriaaliin toisen materiaalin atomeita eli epäpuhtauksia, jotka korvaavat puolijohteen atomeita sen kiderakenteessa [2]. Seostus voidaan tehdä esimerkiksi perinteisellä ioni-implantoinnilla, jossa halutun epäpuhtauden ioneja pommitetaan puolijohteesen. Piihin ja germaniumiin (ryhmä IV) on perinteisesti seostettu ryhmien III ja V alkuaineita kuten boori (B), fosfori (P) tai arseeni (As). Seostusatomit vaikuttavat johtavuuteen joko vastaanottamalla elektronin (akseptori-atomi, N_a) tai luovuttamalla

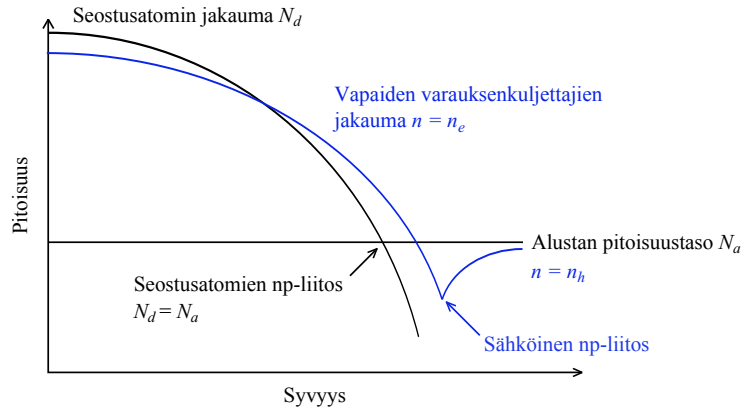
elektronin (donori-atomi, N_d) lisäten vapaiden varauksenkuljettajien määrää joko uudella aukolla tai elektronilla. Ryhmän III seostusatomilla voidaan kasvattaa vapaiden aukkojen lukumäärää ja ryhmän V atomeilla puolestaan vapaiden elektronien määrää. Materiaalit joissa sähkönjohtuminen tapahtuu ainoastaan joko elektroneilla tai aukoilla (ns. enemmistövarauksenkuljettajat) kutsutaan yleisesti n- ja p-tyypin puolijohteiksi.

Seostusatomien pitoisuus N piissä voidaan saada jopa yli 10^{21} cm^{-3} [15], mikä on lähellä teoreettista maksimia ilman kahden eri faasin muodostumista, sillä piiatomien tiheys kiderakenteessa on suuruusluokkaa $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ [8]. Jokainen epäpuhtausatomi ei kuitenkaan lisää vapaiden varauksenkuljettajien määrää, eli ne eivät ole ns. sähköisesti aktivoituja (N^\pm) [2, 15]. Sähköisesti aktivoitu osuus kokonaisseostuksesta voi olla jopa vain yksi prosentti äärimmäisissä tapauksessa, eikä osuus ole välttämättä sama seostuksen syvyys suunnassa [11]. Käytännöllisesti katsoen suurin mahdollinen sähköisesti aktiivinen pitoisuus N^\pm nykyisissä ohuissa puolijohderakenteissa lienee 10^{20} – 10^{21} cm^{-3} [14, 15], ja on kuitenkin huomattava muutos luonnolliseen varauksenkuljettajien pitoisuuteen nähden (taulukko 1). Piin resistiivisyyden kannalta tämä tarkoittaa huomattavaa muutosta 10^{-4} – $10^4 \Omega\text{cm}$, eli seostamalla puolijohteita voidaan päästä metallien tasolle [8]. Germaniumilla resistiivisyyttä voidaan nykyisin muuttaa lähes yhtä paljon [3, 11]. Pitoisuuksia yleensä lyhennetään merkinnöillä n^- , n tai n^+ tarkoittaen eri pitoisuuksia toistensa suhteen.

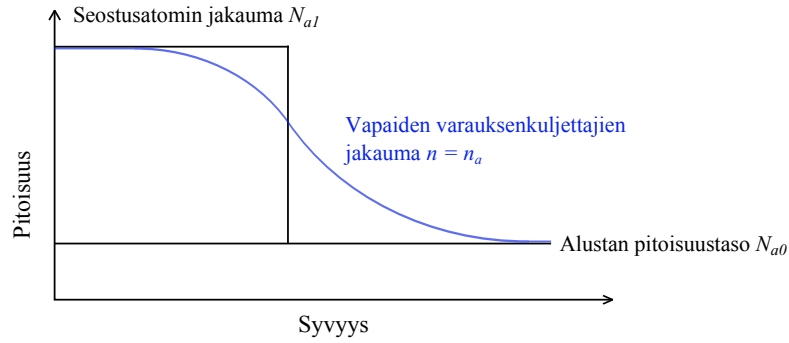
2.2 Rakenteiden perusteet

Tämän työn kannalta puolijohderakenteet ovat yksinkertaisia, ns. yksiulotteisia rakenteita, joissa seostuksen pitoisuus muuttuu vain syvyys suunnassa. Useimmiten seostuksen perustutkimusta suoritetaan tällaisilla näytteillä [8, 11], ja tämän työn mittausmenetelmiä käytetään yleisesti ottaen ainoastaan yksiulotteiseen analysointiin ja erityisesti syvyystiedon mittaukseen [3, 14]. Monimutkaisempien rakenteiden (kaksi- ja kolmiulotteiset) analysointiin on olemassa muita tekniikoita [1]. Puolijohderakenteiden vaakasuuntaista kokoa rajoittaa käytännössä litografian resoluutio [8].

Historiallisesti rakenteiden koko on pienentynyt yli $100 \mu\text{m}$ paksuisista nykyisiin



Kuva 1: Hahmotelma ioni-implantoinnilla valmistetusta puolijohderakenteesta, missä n -tyypin seostus N_d on implantoitu p -tyypin alustalle N_a (n^+p -rakenne). Kuvassa on myös esitetty hahmotelma vapaiden varauksenkuljettajien sisäisestä diffuusiosta (n)



Kuva 2: Hahmotelma p -tyypin askeljakaumasta (p^+p -rakenne), missä vapaiden varauksenkuljettajien sisäinen diffuusio pyöristää seosatomien jakaumaa

jopa vain muutaman nanometrin paksuisiin kerroksiin asti [14]. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertainen implantoinnilla valmistettu n^+p -puolijohderakenne, missä sähköjohtavuus lähellä pintaa voi olla alustan suhteen huomattavasti suurempi (esim. $N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ja $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 100 % aktivointi).

Puolijohderakenteiden paksuus voidaan määritellä eri tavoin, ja useasti se liittyy varauksenkuljettajien tai seostusatomien liitoskohtiin, pitoisuustasoihin tai siihen osaan, jossa suurin osa sähkövirrasta kulkee [14]. Puolijohderakenteissa esiintyy usein kahden eri seostuksen liitoskohtia, ns. pn-liitoksia, joita luonnehtii seostustyyppin vaihtuminen toiseksi niin atomi- kuin sähköisellä tasolla [2]. Kuvassa 1 on havainnollistettu seostusatomien pn-liitoskohta (engl. *metallurgical junction* [16]), missä kahden eri seostusatomien pitoisuudet ovat yhtä suuria, $N_d = N_a$. Tällainen rakenne on mahdollista valmistaa

mm. implantointi-menetelmällä, mutta esimerkiksi kasvatetuissa rakenteissa liitoskohdan jälkeen toista seostusatomia ei ole lainkaan, kuten kuvan 2 p⁺p-rakenteessa.

Seostusatomien liitoskohdan lisäksi voidaan määritellä sähköinen liitoskohta (engl. *electrical junction* [16]), missä eri vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuudet ovat yhtä suuret [2]. Sähköinen liitoskohta ei kuitenkaan ole samassa paikassa kuin seostusatomien liitoskohta, koska vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuuserot saavat aikaan (sisäistä) diffuusiota. Diffuusio ei tasoita pitoisuuseroja täysin, koska vastakkaisesti ionisoidut (aktivoituneet) seostusatomit pysyvät paikoillaan ja rajoittavat siten diffuusioetäisyyttä. [3] Näin ollen vapaiden varauksenkuljettajien ja seostusatomien pitoisuusjakaumat eivät itse asiassa ole täysin samanlaiset, kuten kuvissa 1 ja 2 on havainnollistettu.

Käytännöllisesti katsoen sisäinen diffuusio on sähköisten analysointimenetelmien alin resoluutio aktivoitujen seostusatomien jakauman selvittämiseksi. Diffuusioetäisyys on verrannollinen ns. (ulkoiseen) Debye-pituuteen L_D :

$$L_D = \sqrt{\frac{k_B T \epsilon}{q_e^2 (n_h + n_e)}},$$

missä $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K on Boltzmannin vakio, T on lämpötila (K) ja ϵ on permittiivisyys. Yhtälön mukaan Debye-pituus germaniumissa ($\epsilon = 16 \times 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) ja huoneenlämpötilassa (300 K) on noin 500, 50, 5 ja 0,5 nm (aktiivisille) seostuspitoisuuksille 10^{14} , 10^{16} , 10^{18} ja 10^{20} cm⁻³. Jos seostusatomien jakauma muuttuu Debye-pituuden kokoluokassa, diffuusio vaikuttaa seostusatomien ja varauksenkuljettajien jakaumien eroihin. [3] Sisäisen diffuusion lisäksi mittaustekniikat voivat aiheuttaa ylimääräistä diffuusiota, joka on yleensä huomattavasti voimakkaampaa ja täysin erisuuntaista kuin sisäinen diffuusio (ks. osio 3.3.2) [14, 17].

Sähköiselle liitokselle on luonnollisesti myös olennaista hyvin suuri resistiivisyys, koska vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuus on ympäröiviin alueisiin nähden vähäistä [2] – liitosta pidetäänkin useasti eristekerroksena, jonka läpi ei kulje merkittävässä määrin sähköä. Erityisesti nelipisteanturimittaukset (neliövastus) ovat hyvin riippuvaisia liitoskohdan hyvästä eristekyvystä. Se ei luonnollisesti ole täydellinen eriste, joten se voi vuotaa, ja pienissä ohutkerrosrakenteissa liitoksen läpäisevän sähkövirran tiheys

voi olla 10^{-7} – 10^{-3} A/cm² [18]. Vuotaminen voi vääristää mittaustuloksia ja vaikeuttaa analysointia. Mittauksissa sähköinen liitoskohta esiintyy juuri kuvan 1 mukaisena (netto)varauksenkuljettajien minimikohtana eli resistiivisyysjakaumassa maksimikohtana.

3 Mittausmenetelmät

Tässä osiossa esitellään ensimmäiseksi kaksi hyvin perustavaa laatua olevaa analysointitekniikkaa puolijohdetutkimuksessa – leviämistä vastusta (SRP) ja nelipisteanturimittaus, joista ensimmäinen on kaksipistemittaus ja jälkimmäisessä käytetään nimensä mukaisesti neljää kontaktia. Kummassakin mittausmenetelmässä mitataan jännitteen ja virran suhdetta, eli tutummin vastusta (resistanssia), johon olennaisesti vaikuttaa resistiivisyys ja siten myös vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuus. Lähtökohtaisesti vastukset ovat määriteltä toisistaan poikkeavasti, mutta ne ovat kuitenkin kytkettyneitä toisiinsa.

Perinteisesti SRP-mittauksella mitataan aktivoitujen seosatomien ja vapaiden varauksenkuljettajien syvyysjakaumia, mutta sitä voidaan käyttää myös resistiivisyyden mittaukseen. Nelipisteanturimittaus on puolestaan ollut käytössä yksinomaan pintamittauksena, jolla voidaan mitata suoraan resistiivisyyttä ja puolijohderakenteissa neliövastusta – kummatkin liittyvät erityisesti puolijohderakenteiden laadun tarkastuksessa niin seostuksen kuin materiaalien puhtauden suhteen. M4PP-anturin koon pienuuden tapauksessa 4PP-mittauksella, erityisesti neliövastusta, voidaan käyttää myös syvyysjakauman mittaukseen, ja sillä on monia houkuttelevia ominaisuuksia SRP-tekniikkaan verrattuna.

Lopuksi katsastetaan ionisuihkuanalyysimenetelmän SIMS perusteisiin. Koska SIMS-menetelmä perustuu näytteen eroosioon (sputterointi), sillä on tarkoituksena mitata (seostus)atomien pitoisuutta eikä sinänsä sähköisiä ominaisuuksia.

3.1 Leviämistä vastusmittaus, SRP

Leviämistä vastus on ollut tunnettu jo ainakin 1800-luvulta lähtien maineikkaan skottilaisen fyysikon J. C. Maxwellin teoksessa [19]. Puolijohdetutkimuksessa SRP-tekniikka on ollut käytössä 1960-luvulta lähtien syvyysjakauman mittauksessa erityisesti Schumannin ja Gardnerin monikerrosmallin ja numeeristen menetelmien kehityksien ansiosta [14, 20, 21]. SRP-mittauksen herkkyys on olennaisesti verrannollinen anturien kontaktisäteeseen [3, 14].

SRP-mittaukset ovat verrattain yksinkertaisia, sillä voidaan mitata varauksenkuljettajien pitoisuuksia hyvin suurelta väliltä $10^{12} - 10^{21} \text{cm}^{-3}$ ja mittaukset voidaan suorittaa nopeasti, huoneenlämpötilassa ja ilmanpaineessa. Mutta resistiivisyyttä ei voida mitata täysin suoraan, vaan sen selvittämiseksi tarvitaan erillisiä kalibraationäytteitä – SRP-tekniikka on luonteeltaan vertaileva mittaustekniikka. Sen lisäksi anturit tarvitsevat useasti vaativan ja työlään esikäsittelyn, ja kontaktivastus metalli-anturin ja puolijohteen välillä voi olla kaksipistemittauksessa hyvin suuressa osassa. [14]

3.1.1 Leviämistä ja mittauksen perusperiaate

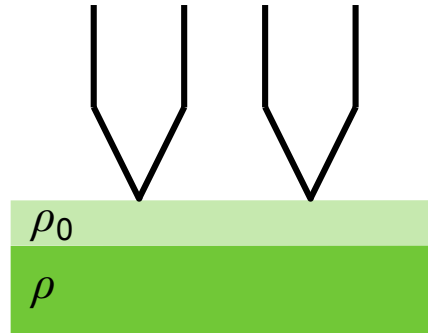
Alun perin leviämistämittauksissa käytettiin yhtä johdinta ja suurta takakontaktia. Pienestä kontaktialasta sähkövirta luontaisesti levittäytyy suuremmalle alueelle jos vain mahdollista, ja se aiheuttaa omanlaisensa vastuksen nimeltään leviämistävastus. Suurin osa leviämistävastuksesta aiheutuu kontaktin välittömässä läheisyydessä, noin viisi kertaa kontaktin säteen käsittämässä tilavuudessa [3], mikä on hyvin oleellista mittaustekniikan näkökulmasta, sillä näytteestä saadaan tietoa lokaalisti. Tästä huolimatta hyvin ohuissa puolijohderakenteissa myös kontaktien välialueella voi olla vaikutusta mittaukseen [14].

Suuren takakontaktin sijasta perinteisessä SRP-mittauksessa käytetään kahta vierakkäistä pienen kontaktialan omaavaa anturia (ks. kuva 3), joiden välistä jännitettä V mitataan. Jos oletetaan kontaktin olevan ohminen, ympyränmuotoinen ja kontaktisäde on tarpeeksi pieni antureiden välisen etäisyyden ja mitattavan (homogeenisen) kappaleen paksuuden suhteen, pienillä jännitteillä mitattava vastus aiheutuu leviämistävastuksesta R_s :

$$R_s = \frac{\rho}{2r}, \quad (3)$$

missä ρ on resistiivisyys ja r on kontaktisäde. [14, 22] Perinteisissä SRP-mittauksissa jännite pidetään yleensä vakiona (5 mV), antureiden kontaktien välimatka on tyypillisesti 25–40 μm ja kontaktisäde on noin mikrometrin kokoluokkaa. [14]

Jos kontaktisäde tiedetään, yhtälöstä (3) voidaan siis ratkaista resistiivisyys, ja sen



Kuva 3: Kaksipistemittauksessa tarpeeksi suurilla antureilla homogeenisen puolijohderakenteen (ρ_0) resistiivisyyden mittaukseen voi vaikuttaa myös alustan resistiivisyys (ρ): alusta voi kasvattaa mitattua vastusta ($\rho_0 < \rho$) tai pienentää sitä ($\rho_0 > \rho$) kuin jos alusta ei vaikuttaisi lainkaan. [14]

avulla varauksenkuljettajien pitoisuus yhtälöä (2) käyttäen. Käytännössä kontaktisäde ei ole ennalta tiedossa, joten ennen jokaista varsinaista mittausta se täytyy mitata. Ainoa menetelmä kontaktisäteen laskemiseksi on mittaamalla näytteitä, joissa vastuksen ja resistiivisyyden suhde (kalibraatiokäyrä, $R_s(\rho)$) tiedetään tarkasti. Tässä tapauksessa mitattava vastus voidaan liittää suoraan tiettyyn resistiivisyyden arvoon ja kontaktisäde voidaan laskea yhtälöstä (7). Kalibrointiin on olemassa standardinäytteitä monelle eri resistiivisyyksille ja kummallekin seostukselle (n ja p) on omansa. [14]

3.1.2 Kontaktivastus ja korjauskerroin

Käytännössä kaksipistemittaukseen vaikuttaa aina myös kontaktivastus. Se muodostuu metallisen anturin ja mitattavan puolijohteen välille ja se vaikuttaa täysin puolijohdepinnan läheisyydessä, joten kontakti- ja leviämisvastukset ovat sarjassa toisten suhteen:

$$R_{\text{mitattu}} = R_c + R_s. \quad (4)$$

Riippuen tilanteesta kontaktivastus voi olla suurempi tai pienempi kuin leviämisvastus. Se on myös hyvin epälineaarinen resistiivisyyden suhteen. Pienillä resistiivisyyksillä kontaktivastus käyttäytyy ohmisesti, kun taas suurilla resistiivisyyksillä se voi olla

riippumaton resistiivisyydestä. Kontaktivastukseen vaikuttaa myös metallisen anturin materiaali ja kontaktiala, sekä myös puolijohteen pinnan ominaisuudet (pintatilat, geometriset tekijät yms.) voivat vaikuttaa kontaktivastukseen hyvin paljon [14, 23].

Yhtälö (3) ennustaa mitattavan vastuksen ja resistiivisyyden, eli kalibraatiokäyrän $R_s(\rho)$, olevan lineaarinen resistiivisyyden suhteen. Näin ei käytännössä kuitenkaan ole, vaan kalibraatiokäyrä voi olla hyvinkin epälineaarinen. Yleisesti ottaen kalibraatiokäyrä on kuitenkin lineaarinen log–log-asteikolla, eli $R_s \propto \rho^k$, missä log-log-kulmakerroin k on tyypillisesti hieman yli tai alle arvon yksi. [14]

Epälinearisuuteen vaikuttaa monessa tapauksessa juuri kontaktivastuksen epälinearisuus resistiivisyyden suhteen (epäohmisuus), mutta myös kontaktisäteen riippuvuus niin materiaalista kuin alla olevasta resistiivisyydestä voi aiheuttaa epälineaarisen vasteen kalibraatiokäyrään. Perinteisissä SRP-mittauksissa on ollut myös ongelmana anturipäiden työntyminen materiaaliin (5–10 nm, anturien kuormana 5 g) johtuen mittauksissa tarvittavasta suuresta kontaktipaineesta, joka on jopa yli 10 GPa. Esimerkiksi piissä suurta painetta tarvitaan muodostamaan β -tina-kiderakenne antureiden alapuolelle hyvän (kvasi)ohmisen kontaktin luomiseksi ja joissain tapauksissa myös luonnollisen, eristävä oksidikerroksen läpäisemiseksi. Kontakti ei ole myöskään täysin yhtenäinen vaan koostuu joukosta pieniä kontakteja. Suoraan mitatusta kalibraatiokäyrästä laskettava kontaktisäde ei siis välttämättä ole antureiden todellinen säde, kontaktivastuksen vaikutuksesta huolimatta, vaan sitä kutsutaan sähköiseksi kontaktisäteeksi. [14] Fyysistä kontaktisädettä käytetään myös ja riippuen sen laskentatavasta ja antureista fyysisen säteen vaikutus lopputulokseen ei välttämättä eroa merkittävästi verrattuna sähköisen säteen käyttöön. [14, 24]

Kontaktivastuksen lisäksi ohuiden puolijohderakenteiden leviämistämittauksen tulokseen vaikuttaa myös antureiden koko: jos materiaali ei ole homogeeninen, mitattu leviämistämittaus on antureiden vaikutusalueen resistiivisyysjakauman yhteisvaikutuksen tulos. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertainen tapaus, missä homogeenisesti seostetun puolijohderakenteen mittauksessa antureiden mittausherkkyyksy voi ylittää alustaan asti. Alusta voi olla resistiivisyydeltään suurempi tai pienempi, jolloin puolijohderakenteen mitattu leviämistämittaus on vastaavasti suurempi tai pienempi kuin jos puolijohderaken-

ne olisi hyvin paksu. [14] Tämä ja syvyysjakauman tapauksessa myös useamman eri resistiivisyyskerroksen vaikutukset voidaan ottaa huomioon mitattavan päällimmäisen kerroksen suhteen korjauskertoimella CF (engl. *Correction Factor*):

$$R_{s0} = \frac{\rho_0}{2r(\rho_0)} \cdot \text{CF}[\rho_0, \rho, r(\rho_0), s, \Delta h], \quad (5)$$

missä ρ on alustan resistiivisyys, $r(\rho_0)$ on nyt sähköinen kontaktisäde, s on antureiden välinen etäisyys ja Δh on kerroksen paksuus (alustalle yleensä $\Delta h \rightarrow \infty$).

Korjauskerroin CF voidaan laskea Schumannin ja Gardnerin monikerrosmallin mukaisesti. Mallissa korjauskerroin saadaan ratkaisuna Laplace-yhtälölle $\nabla^2\psi = 0$ (ψ on potentiaali) sopivilla reunaehdoilla varustettuna sekä olettamalla kontaktien olevan ohmisia, pyöreitä ja tasaisia. Perinteisen Schumannin ja Gardnerin mallin Laplace-korjauskerroin on

$$\text{CF} = \frac{4}{\pi} \int_0^\infty K(t, \rho_0, \rho, \Delta h) I(t, r) \left[\frac{J_1(rt)}{rt} - \frac{J_0(st)}{2} \right] dt,$$

missä epälineaarinen ydintermi K ottaa huomioon eri resistiivisyyskerrokset ja kerrosten paksuuden Δh , $I(t, r)$ on virranjakauman malli kontaktien alapuolella, J on Besselin funktio ja t on integrointimuuttuja. [14, 21] Kuvan 3 mukaisessa tilanteessa, yksi mitattava kerros alustalla, korjauskertoimen ydintermi on [14, 25, 26]

$$K(t, \rho_0, \rho, \Delta h) = \frac{\rho + \rho_0 \tanh(2t\Delta h)}{\rho_0 + \rho \tanh(2t\Delta h)}. \quad (6)$$

Monikerrosmallin käytön edellytys on siis alla olevan resistiivisyysjakauman tunteminen, joka ei kuitenkaan yleensä ole tiedossa – mallia käytetäänkin juuri syvyysjakauman mittaukseen, kuten osiossa 3.3.3 kerrotaan tarkemmin.

Korjauskerroin voi poiketa luvusta yksi hyvinkin paljon, etenkin ohuissa pn-liitoksellisissä näytteissä mitattu vastus ei ole täysin leviämistä vastusta, koska sähkövirralla ei yksinkertaisesti ole mahdollista levittäytyä täysin kolmiulotteisesti. [27] Suuri korjauskertoimen arvo vaikuttaa hyvin paljon syvyysjakauman mittauksissa.

Kontaktivastus täytyy periaatteessa ottaa huomioon, ja se voidaan tehdä monel-

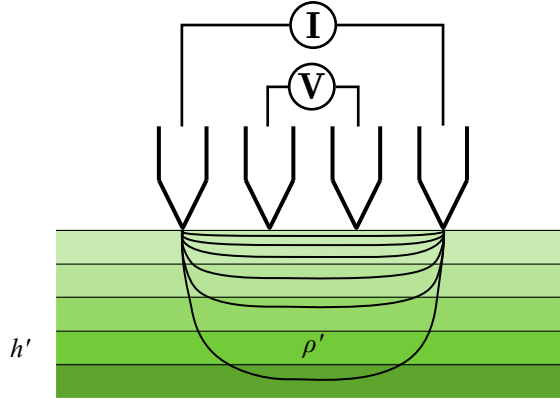
la eri tavalla eri ratkaisualgoritmeilla. Tarkoissa mittauksissa kontaktivastusta varten tarvittaisiin uusia kalibraationäytteitä ja myös 4PP-mittauksen yhdistämistä SRP-mittauksiin sekä puolijohteen pinnan ominaisuuksien mittausta. [14] Tässä työssä käytetään kuitenkin kahta yksinkertaistettua menetelmää kontaktivastuksen vähentämiseksi mittaustuloksista: Yhtälön (4) mukaisesti mitatusta kalibraatiokäyrästä voidaan vähentää puhtaasti leviämistä vastustuksesta johtuva kalibraatiokäyrä (kontaktisädekalibraatiokäyrä; yhtälö (3)), jossa kontaktisäteenä on käytetty SRP-antureiden fyysisiä jälkiä. Tässä tapauksessa kontaktisäde on anturin jättämien pienten kontaktirykelmien halkaisija. [28] Toinen tapa on kokeellisin tuloksin todettu toimivan hyvillä SRP-mittauslaitteilla ja -valmisteluilla: kontaktivastus on puolet mitatusta kalibraatiokäyrästä kaikilla resistiivisyyksillä [14, 29].

3.2 Nelipisteanturimittaus, 4PP

Nelipistemittausta on käytetty ainakin jo 1800-luvun puolivälin jälkeen hyvin pienten vastuksien mittauksessa [3, 30]. Neljän kontaktin tapauksessa jännite voidaan mitata eri kontakteista kuin mistä sähkövirtaa syötetään (kuva 4), ja siten ainoastaan mitatun kappaleen vastus vaikuttaa mittauksissa eikä kontaktivastuksella ole enää merkitystä [3].

Nykyisessä puolijohdetutkimuksessa 4PP-mittaukset alkoivat yleistyä 50-luvulta lähtien, jolloin sen peruseriaatteet kehittyivät [31–34]. Nelipisteanturimittausta on käytetty mm. puolijohdekiekkojen laadun tarkastuksessa ja seostuksen valvontaan puolijohderakenteissa. Perinteisesti nelipistemittaukset ovat olleet lähinnä pintamittauksia, jolla voidaan mitata suoraan resistiivisyyttä ilman erillistä kalibraatiota, mutta puolijohderakenteiden tapauksessa resistiivisyyden sijaan käytetäänkin neliövastusta. [3]

Nykyaikaisissa hyvin ohuissa (alle 100 nm) puolijohderakenteissa perinteinen 4PP-mittaus on ollut vaikeuksissa [18, 35, 36], koska siinä käytetään hyvin suurta kuormaa antureille (20–100 g), jolloin anturit työntyvät liian paljon pinnan läpi (20–130 nm) vääristäen mittaustulosta [14]. Sen lisäksi antureiden kontaktien välinen etäisyys on suuri (20–1 000 μm [14]), joka heikentää mittausten herkkyyttä epähomogeenisuuksille



Kuva 4: Nelipisteanturimittauksessa puolijohderakenteen pinnalta mitattuun neliövastuksen arvoon vaikuttaa rakenteen resistiivisyyden syvyysjakauma (eri ρ' -kerrokset, paksuus dh') sähköjohtavuuden rinnakkaismallin mukaisesti. Kuvassa 4PP-anturin koko (vierekkäisten kontaktien välinen etäisyys) on rakenteen suhteen liioiteltu selvyyden vuoksi.

erityisesti sivuttaissuunnassa [5] ja lisää alustan vaikutusta mittauksissa (pn-liitos vuotaa) [18]. M4PP-antureilla kontaktivoima on jopa 100 000-kertaisesti pienempi (kuormana noin 0,3 mg [37]) eikä työntymistä käytännössä tapahdu [5], ja kontaktien välinen etäisyys on jopa vain 1,5 μm . Tässä työssä käytettiin enemmän kuitenkin 10 μm -anturia, koska sen käyttöikä on pidempi.

3.2.1 Neliövastus

Neliövastus R_{\square} (engl. *sheet resistance*) määritellään yksinkertaisimmillaan homogeeniselle ja tasapaksuiselle kappaleelle

$$R_{\square} \equiv \frac{\rho}{h}, \quad (7)$$

missä ρ on resistiivisyys ja h on mitattavan kappaleen paksuus. Neliövastuksen yksikkö on määritelmän (7) mukaan Ω , mutta sille yleisesti käytetään joko yksikköä Ω/\square tai Ω/sq erottuakseen tavallisesta vastuksesta. [3]

Neliövastuksen ajatus [3] voidaan mieltää kappaleen vastuksen määritelmästä $R = \rho L/A = \rho L/hW$ [13] suorakulmion tapauksessa, jossa sähkövirrantiheys J on vakio poikkipinta-alalla. Yhtälössä L on kappaleen pituus mittauspäiden suunnassa, $A = hW$

on sekä mittauskontaktien että kappaleen poikkipinta-ala, W on leveys ja h on paksuus. Neliönmuotoisen kappaleen ($L = W$) vastus on siis suoraan neliövastus, $R = R_{\square}$, ja yleisesti ottaen $R = R_{\square} \cdot (L/W)$ suorakulmioille. Yhtä paksujen alueiden kokonaisvastus voidaan laskea helposti mittaamalla neliövastuksen avulla.

Puolijohderakenteiden tapauksessa mittaus tapahtuu kuitenkin eri tavalla, joka on havainnollistettu kuvassa 4: mittauskontaktit ovat yleensä hyvin pieniä ja ne ovat vierekkäin näytteen pinnalla eikä sähkövirrantiheys välttämättä ole vakio poikkipinta-alalla, mutta sähkövirran johtumista rajoittaa olennaisesti juuri paksuus h .

Paksuus ei usein ole tarkasti tiedossa tai edes määriteltävissä. Tässä mielessä neliövastus on hyvä vastine resistiivisyydelle puolijohdeiden seostuksen ja laadun analysoinnissa ja tarkastuksessa, koska kuvaa 4 mukailten kontaktien alla olevan seostuksen syvyysjakauma vaikuttaa mitattuun neliövastukseen yhtälöllä

$$R_{\square}(h) = \frac{1}{\int_0^h 1/\rho(h') dh'}, \quad (8)$$

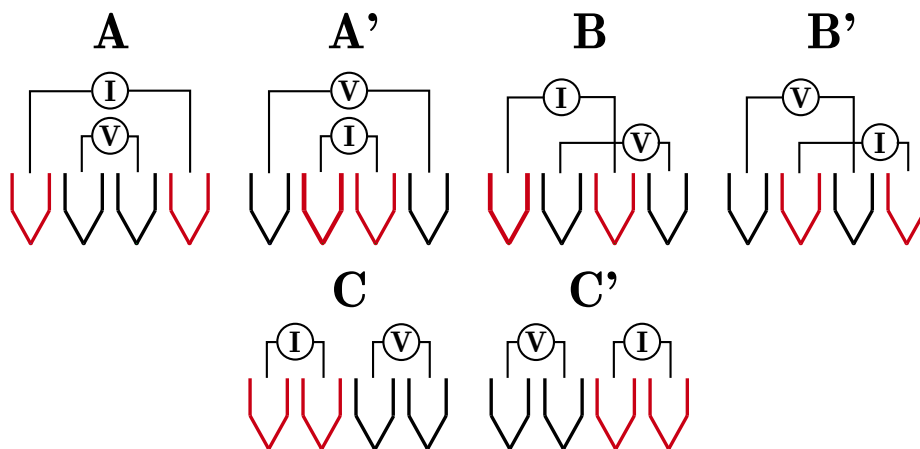
missä $\rho(h')$ on resistiivisyys syvyydellä h' [3, 38], ts. neliövastus kuvaa koko seostusjakauman vaikutusta sähköisessä kontaktissa. Yhtälössä mitattavan kappaleen ajattelaaan koostuvan rinnakkaisista ja ohuista vakioresistiivisyyden kerroksista [38], joiden läpi sähkövirta johtuu vastuksien rinnakkaismallin [13] mukaisesti. Yhtälöä käytetään yleisesti muilla menetelmillä ratkaistun syvyysjakauman $\rho(h)$ tarkistukseen vertaamalla sillä laskettua ja pinnalta mitattua neliövastusta toisiinsa.

Käytännössä määritelmässä (7) ja yhtälössä (8) oletetaan sähkövirran johtuvan täysin kaksiulotteisesti, eli sähkövirtaa ei johdu syvyys suunnassa lainkaan. Tarkalleen ottaen kontaktien läheisyydessä tapahtuu sähkövirran leviämistä, mutta antureiden väliin etäisyyksiin nähden sillä ei oleteta olevan vaikutusta. Leviämisellä ei ole varsinkaan vaikutusta, kun jännite mitataan eri kontakteilla kuten kuvassa 4. Tällainen tilanne on mahdollista, jos sähkövirran kulkua rajoitetaan paksuudella, joka on puolijohderakenteiden tapauksessa eristävä pn-liitos – neliövastusmittausten hyödyllisyys rajoittuukin lähes ainoastaan tällaisiin puolijohderakenteisiin. Tämä on luonnollisesti yksi hyvin rajoittava tekijä erilaisten näytteiden analysoinnin suhteen.

3.2.2 Neliövastuksen mittaaminen

Hyvin yleinen ja myös M4PP-tekniikassa käytetty mittaussasetelma nelipisteanturimitauksessa on esitetty kuvassa 5, missä kontaktit ovat toistensa suhteen samalla suoralla (kontaktilinja) ja yhtä kaukana toisistaan. Kuvassa on myös esitetty kaikki mahdolliset erilaiset jännite–sähkövirta-mittaussasetelmat, ja niitä on periaatteessa vain kolme, jos sähkövirran suunnan muutosta ei oteta huomioon eikä mittauksissa ole mukana ulkoista magneettikenttää ($V_i = V_{i'}$). [5] Muitakin mittaussasetelmia on ja niitä on käytetty, eikä antureiden välisillä sijainneilla ole teoriassa rajoitteita [3].

Nelipisteanturimitauksissa vastus ei jokaisessa tilanteessa suinkaan ole neliövastusta, kuten edellisen osion lopussa mainittiin, vaan sen luonne on hyvin riippuvainen näytteen rakenteesta ja erityisesti sen paksuuden suhteesta antureiden väliseen etäisyyteen. Jos anturit ovat pieniä ja tarpeeksi lähellä toisiaan suhteessa mitattavan kappaleen paksuuteen, nelipisteanturimitauksilla voidaan itse asiassa mitata suoraan re-



Kuva 5: Kaikki erilaiset mittaussasetelmat nelipisteanturimitauksessa, jossa anturit ovat samalla suoralla toistensa suhteen ja yhtä kaukana toisistaan. Ilman ulkoisen magneettikentän vaikutusta $R_i = R_{i'} = V_i/I$ ($i = A, B, C$).

Taulukko 2: Yhtälön (10) korjauskertoimien tarkat arvot kuvan 5 eri mittaussasetelmille [5]

Mittaussasetelma	A, A'	B, B'	C, C'
Korjauskerronin, c	$\frac{\pi}{\ln 2}$	$\frac{2\pi}{\ln 3}$	$\frac{2\pi}{\ln(4/3)}$

sistiivisyyttä, ja esimerkiksi kuvan 5 mittausasetelmalle A resistiivisyys voidaan laskea yhtälöstä

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}, \quad (9)$$

missä s on vierekkäisten kontaktien välinen vakioetäisyys. Epähomogeenisesti seostetuilla puolijohderakenteilla resistiivisyys on keskiarvoistettu. Mitatun vastuksen ja resistiivisyyden arvo on myös muilla mittausasetelmilla riippuvainen ainoastaan kontaktien etäisyyksistä. [3] Yhtälö (9) tarvitsee kuitenkin korjauskertoimia johtuen mm. näytteen paksuudesta, tasopinnan äärellisestä alueesta (etäisyydestä reunoihin) ja reunojen muodoista – kertoimet voivat olla hyvinkin isoja. Yhtälöä voidaan käyttää sellaisenaan, jos $s \leq h/2$ (h on paksuus) ja $s \leq d/4$ (d on etäisyys reunoista). [3]

Kun kontaktien välinen etäisyys on suuri suhteessa mittavan kappaleen paksuuteen ($s > h$), mittaustilanne on enemmän määritelmän (8) mukainen. Tässä tapauksessa puolijohderakenteiden nelipisteanturimittauksissa saadaan mitattua suoraan neliövastusta:

$$R_{\square} = c_i \frac{V_i}{I}, \quad (10)$$

missä c_i on geometrinen korjauskerroin eri mittausasetelmille $i = A, B, C$. [3, 5] Korjauskertoimet on lueteltu taulukossa 2, missä näytteen on oletettu olevan äärettömän suuri tasopinta ($d > 40s$) [5, 39].

Antureiden välinen etäisyys ei voi kuitenkaan olla mielivaltaisen suuri suhteessa mittavan puolijohderakenteen paksuuteen, koska eristävästä pn-liitoksesta huolimatta sähkövirta voi läpäistä liitoskohdan. Alustan vaikutus nelipistevastukseen on riippuvainen myös sen neliövastuksen suhteesta puolijohderakenteen neliövastukseen, ja vaikutusta voidaan arvioida ns. transitio-etäisyydellä λ :

$$\lambda \approx \sqrt{\frac{25,9 \text{ mV}}{J_s (R_{\square} + R_{\square,0})}},$$

missä R_{\square} on puolijohderakenteen neliövastus, $R_{\square,0}$ on alustan neliövastus ja J_s on pn-liitoksen läpi vuotava sähkövirta. [18, 40] Jotta alustalla, tai sähkövirralla J_s , ei ole vaikutusta, antureiden välisen etäisyyden tulisi olla paljon pienempi kuin transitioetäisyys eli $s \ll \lambda$. Toisaalta tilanteessa $s \gg \lambda$ nelipistemittauksessa mitataan lähinnä alustan resistiivisyyttä yhtälön (9) mukaisesti. Teoreettisesti M4PP-tekniikalla ja 10 μm -anturilla suuretkaan virran J_s arvot eivät vaikuta tulokseen, vaikka alustan ja puolijohderakenteen neliövastukset olisivat yhtä suuret [40]. Kokeellisesti puolestaan 11 nm puolijohderakenteita voidaan mitata tarkasti jo 20 μm -anturilla [40] ja jopa noin 8 nm paksuisia rakenteita on mitattu onnistuneesti [36]. Toisaalta mielivaltaisen pieniä puolijohderakenteita ei voida mitata, vaikka anturi olisi oikeankokoinen, koska varauksenkuljettajia ei olisi tarpeeksi. Kun varauksenkuljettajien pitoisuus on tarpeeksi alhainen, materiaali ei ole enää sähkönjohtumisen kannalta pitkittäissuunnassa yhtenäinen, mikä vaikuttaa suoraan neliövastuksen määritelmään ja yhtälöön (8). [5]

Neliövastuksen mittaamiseksi käyttäen yhtälöä (10) kontaktien täytyy olla yhtä kaukana toisistaan. Todellisissa mittauksessa tällainen ehto on hyvin vaikeaa toteuttaa, mikä voi vääristää tuloksia huomattavasti – etenkin pienillä etäisyyksillä, mikä on tilanne M4PP-tekniikan tapauksessa. Toinen virhetekijä kontaktien sijainnissa, muutos kontaktilinjaa kohtisuorassa olevassa suunnassa, tulee merkittäväksi virhetekijäksi vasta kontaktien välisen etäisyyden ollessa alle mikrometrin (toisen asteen virhetekijä). [5] Kun neliövastusta mitataan yhdistämällä kahden eri mittausasetelman tulokset, kontaktien välisillä etäisyyksillä ei teoriassa ole merkitystä käyttäen ns. van der Pauw -mittausgeometriaa.

Van der Pauw osoitti 50-luvulla käyttäen konformikuvauksia, että kun puolijohde(rakenne) on yhtenäinen niin alueeltaan (ei eristealueita) kuin paksuudeltaan ja kontaktisäde on tarpeeksi pieni, kontaktit voivat olla täysin mielivaltaisesti sijoitettu täysin mielivaltaisen muotoisen kappaleen eristävällä reunalla neliövastusta mitattaessa [33, 34]. Tätä ajatusta voidaan soveltaa kuvan 5 mittausasetelmiin, koska kontaktien välissä ja kontaktilinjaa kohtisuorassa olevassa suunnassa sähköä ei johdu lainkaan. Näin ollen kappaleen voisi jakaa kontaktilinjaa (symmetriasuora) pitkin kahteen erilliseen osaan, jotka kummatkin toteuttaisivat van der Pauw -ehdot. Yksittäisessä

puoliskossa sähkövirta olisi vain puolet alkuperäisestä, eli van der Pauw -vastukseen verrattuna yhdistetyn kappaleen vastus olisi kaksinkertainen. Täten kuvan 5 mittausasetelmille van der Pauw -yhtälöt eri mittausasetelmien yhdistelmille ovat [33, 41, 42]

$$\exp\left(\frac{2\pi R_A}{R_\square}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_B}{R_\square}\right) = 1, \quad (10a)$$

$$\exp\left(\frac{-2\pi R_A}{R_\square}\right) + \exp\left(\frac{2\pi R_C}{R_\square}\right) = 1 \quad (10b)$$

ja

$$\exp\left(\frac{2\pi R_C}{R_\square}\right) - \exp\left(\frac{-2\pi R_B}{R_\square}\right) = 1, \quad (10c)$$

missä vastukset R_A , R_B ja R_C ovat siis mitattuja vastuksia kuvan 5 mukaisesti ja joista neliövastus voidaan ratkaista numeerisesti. Yhtälöitä käyttämällä voidaan mitata hyvin tarkasti myös hyvin pieniä näytteitä anturin kokoon nähden (esim. neliölle $s \geq 4d$) ilman korjauskertoimia, kun mittaus suoritetaan kappaleen symmetriasuoralla [42].

Van der Pauw -yhtälöiden lisäksi eri mittausasetelmien yhdistelmiä käytetään, koska nelipisteanturimittausten herkkyys on erilainen eri asetelmilla. Nelipisteanturimittaukset ovat herkkiä epähomogeenisuuksille sivuttaissuunnassa – tosin kuin kaksipistemittaukset, jotka ovat herkkiä suoraan antureiden kohdalla. Eli mittauksiin vaikuttaa kontaktien ympäristö (naarmut yms. jotka rajoittavat/estävät sähkövirran johtumista ja resistiivisyyden epähomogeenisuudet). Yksittäisillä mittausasetelmilla herkkyys voi olla sekä positiivista että negatiivista, ts. mittauskohtaa ympäröivä korkeampi resistiivisyys voi sekä kasvattaa että alentaa mitattua neliövastusta. Herkkyys kahden eri asetelman yhteistuloksessa on sen sijaan ainoastaan positiivista vastaavassa tilanteessa. Epähomogeenisuuden vaikutus mitattavaan vastukseen ylittää noin kaksi kertaa kontaktien välisen etäisyyden päähän kontaktilinjan keskikohdasta mitattuna. [5] Tälle ei tiedettävästi ole korjaustermiä M4PP-mittauksille.

3.2.3 Nelipiste- ja kaksipistemittausten yhteys

Pienten ja pn-liitoksellisten puolijohderakenteiden tapauksessa leviämistä voidaan myös käyttää suoraan neliövastuksen mittaukseen: kun leviämistä mitataan yhdessä kohdassa usealla eri kontaktien välisellä etäisyydellä, neliövastus voidaan laskea yhtälöstä

$$R_{\square} = \pi \frac{d R_s}{d \ln s}, \quad (11)$$

missä R_s on mitattu leviämistä ja s on kontaktien välinen etäisyys. [14] Nelipiste- ja kaksipistemittausten suhde ei suinkaan ole rajoittunut vain pienten puolijohderakenteiden tapauksiin, vaan yleisesti ottaen epähomogeenisen nelipistemittauksen vastus R_{4PP} voidaan ilmaista leviämistä avulla:

$$R_{4PP}(h, s) = R_s(h, s) - R_s(h, 2s),$$

kun anturit ovat sijoitettu samalle suoralle toistensa suhteen. [14, 43]

3.3 Syvyysjakauman mittaus

Aivan viime vuosiin saakka SRP-tekniikka on myös ollut hyvin luotettava puolijohderakenteilla, jotka ovat olleet jopa alle mikrometrin paksuisia. Yleisesti ottaen nykyiset alle 100 nm ja alle 50 nm rakenteiden syvyysjakaumamittaukset eivät välttämättä ole olleet täysin luotettavia perinteisellä SRP-mittauksella – monessa tapauksessa johtuen juuri SRP-antureiden suuresta koosta, joka heikentää mittausherkkyyttä (suuri kontaktisäde ja korjauskerroin), sekä myös anturien suuresta kuormasta johtuen. [14]

Perinteistä 4PP-mittausta ei ole syvyysjakauman mittauksessa käytetty lähinnä sen suuren koon ja suuren kontaktipaineen takia. M4PP-anturilla koko on saatu hyvin paljon pienemmäksi, mikä suurentaa mittausherkkyyttä ja pienentää painetta huomattavasti. Sen lisäksi SRP-tekniikkaan verrattuna M4PP-tekniikka ei myöskään tarvitse kalibraatiokäyriä eivätkä anturit tarvitse työstä esikäsittelyä ennen mittauksia. Myös SRP-mittaukset M4PP-anturilla (M2PP) ovat lähtökohtaisesti houkuttelevia hyvin pie-

nen kontaktisäteen ja pienen paineen johdosta.

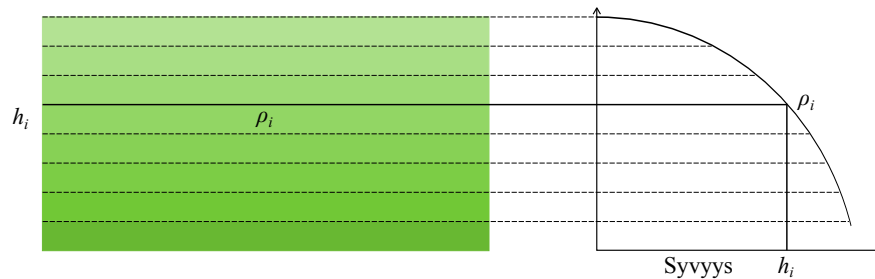
Syvyysjakaumaan päästään käsiksi käyttäen mekaanisesti hiottua viistettä. Sen käyttäminen vaikuttaa kuitenkin mitattuihin tuloksiin nykyisillä puolijohderakenteilla huomattavasti: mitatut vastus- ja varauksenkuljettajien syvyysjakaumat ovat erilaisia viisteellä kuin koskemattoman näytteen sisällä. Sen lisäksi viistepinnan vaurio aiheuttaa ylimääräistä virhettä mittauksissa. [14]

3.3.1 Peruseriaate ja viiste

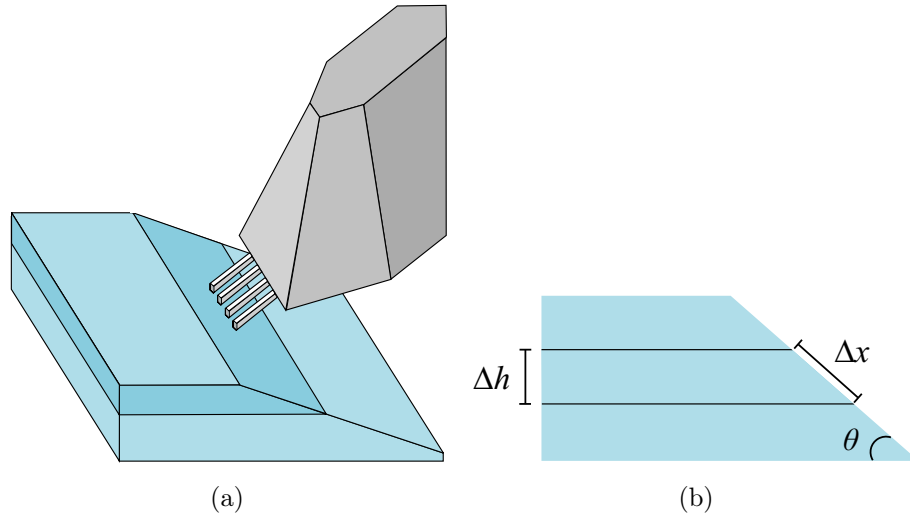
Syvyysjakauman mittauksissa näyte ajatellaan koostuvan useista eri kerroksista, joilla on vakioresistiivisyys kuvan 6 mukaisesti. Kerrosten mittaamiseksi voidaan päästä käsiksi yksinkertaisimmillaan halkaisemalla näyte, mittaamalla leviämistä vastuksen arvoja poikkileikkauksella ja käyttämällä yhtälöä (3) oikeiden kalibraatiokäyrien kanssa, tai vaihtoehtoisesti yhtälöä (7). Syvyys voidaan laskea mittauspisteiden etäisyyksistä.

Edellä kuvattua menettelytapaa ei voida soveltaa SRP- ja M4PP-mittauksissa kuin hyvin yksinkertaisille ja (kontaktien koon suhteen) paksuille puolijohderakenteille: kaksi- ja nelipisteanturimittaukset on perinteisesti tehty askeleissa, ja M4PP-laitteen pienin askel on 100 nm, joten nykyisillä alle 100 nanometrin paksuisilla rakenteilla mittauspisteitä ei kertyisi riittävästi. Perinteisessä SRP-mittauksissa askeleet ovat olleet vielä pienempiä, noin mikrometrin suuruusluokkaa. [14] Jos askel olisi lyhyempi, kontaktijäljet voisivat osua liian paljon toistensa jälkeksi, mistä syntyisi ylimääräistä virhettä [14, 44].

Halkaistun näytteen sijaan mittauksissa käytetään kuvan 7 (a) mukaista viistettä,



Kuva 6: Syvyysjakauman mittauksessa mitattava jakauma koostuu vakioresistiivisyyden kerroksista. Mitä pienempi jako on, sitä tarkemmin kerroksien (h_i, ρ_i) -parit mukailvat todellista jakaumaa



Kuva 7: (a) Syvyysjakauman mittaus käyttämällä viistettä ja (b) havainnollistus mitausaskeleen Δx ja geometrisen syvyysresoluution Δh välisestä yhteydestä viisteellä

jossa askeleiden kulkema matka pystysuorassa syvyys suunnassa on hyvin pieni suhteessa viisteellä kuljettuun matkaan. Viistettä käyttämällä askeleiden määräämä geometrisen syvyysresoluutio voidaan pienentää yhtälöllä

$$\Delta h = \Delta x \sin \theta, \quad (12)$$

missä Δx on askel viisteellä, Δh on vastaava askel pystysuuntaisessa (sisäisessä) syvyysjakaumassa ja θ on viistekulma kuvan 7 (b) mukaisesti. [14] Viistekulma voidaan nykyään saada hyvin pieneksi – jopa $0,1^\circ$, jolla 100 nanometrin askel on oikeassa syvyysjakaumassa noin 0,18 nm. Kemiallisella syövytyksellä (etsaus) on mahdollista valmistaa jopa alle $0,01^\circ$ viistekulmia piissä [45], mikä tarkoittaa edellisen esimerkin mukaisesti alle 0,001 nm geometrista syvyysresoluutiota. Käytännössä viisteen pinta on mittausalustan pinnan suuntainen, eivätkä askeleet Δx siirry lainkaan syvyys suunnassa, kuten kuva 7 (b) antaisi ymmärtää.

Mekaanisella hionnalla ei todellisuudessa saada täysin teräviä kulmia, vaan ne ovat hieman pyöristyneitä 5–20 nm matkalla syvyys suunnassa mitattuna. Pyöristynyt kulma vääristää syvyysjakaumaa vääristämällä yhtälöä (12), aiheuttamalla ylimääräistä pyöristyneisyyttä pitoisuusjakaumassa ja vaikeuttamalla viisteen aloituskohdan määri-

tystä. [14,37] Sitä voidaan kuitenkin korjata käyttämällä ylimääräistä materiaalikerrosta varsinaisen näytteen päällä, jossa pyöritys olisi varsinaisen mitattavan materiaalin sijasta. Ylimääräinen kerros on yleensä myös eristävä (oksidit), jolloin myös varsinaisen näytteen alkukohta saadaan tarkasti selville, sillä eriste ei johda sähköä mutta näyte johtaa. [14]

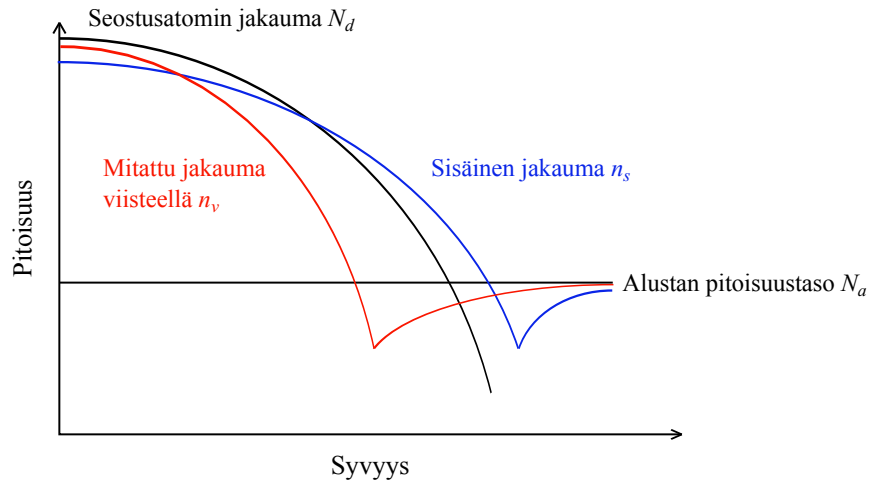
Vaikka viiste olisi teräväkulmainen (ilman ylimääräistä kerrosta), se vaikuttaa mitaustuloksiin jo ennen varsinaisen viisteen alkua, ja vaikutus on sitä suurempi mitä ohuempi mitattava rakenne on ja mitä pienempi anturi on. Johtavan materiaalin poistaminen rajoittaa sähkövirran kulkua geometrisesti, josta aiheutuva mitattavan vastuksen nousu ennen viistettä voi suurimmillaan olla kaksinkertainen kaukana viisteen reunalta mitattuun arvoon (viistekulma 90°). Geometrinen rajoitus vaikuttaa aina pn-liitoksellisissa rakenteissa, ja usean pn-liitoksen sisältävissä rakenteissa se vaikuttaa erikseen ennen jokaista liitoskohtaa. [14]

Ohuissa pn-liitoksellisissa näytteissä, piissä alle 200 nm ja germaniumissa alle 500 nm [46], mitattava vastus voi olla jopa kymmenkertaisesti suurempi kuin kaukana viisteen reunasta mitattu tulos. Näin suurta kasvua ei voida selittää edellisellä geometrisella selityksellä (johtavan materiaalin puutos). Viisteen pinta vaurioituu hionnassa, jonka seurauksena materiaaliin voi syntyä huonosti johtuva kerros monesta syystä: pinta voi olla vaurioitunut geometrisessa mielessä (rosoinen) niin paljon, että se rajoittaa sähkövirran johtumista, vaurioituneella pinnalla liikkuvuus voi olla pienempi tai materiaalin pintatilat voivat tulla merkityksellisiksi, joita voi muodostua huomattavasti lisää. Leviämistä vastusmittauksissa vauriotermi voidaan ottaa huomioon yksinkertaisimmassa tapauksessa (yksi pn-liitos) erotuksena kaukana reunasta ja reunalla mitatuista arvoista. [14]

Viisteestä, pintavauriosta ja pintatiloista aiheutuu myös vakavampaa monimutkaisuutta varsinaiseen mitattavaan jakaumaan, mitä käsitellään seuraavassa osiossa.

3.3.2 Viistediffuusio ja -jakauma

Viiste vaikuttaa itse asiassa myös vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuusjakaumaan aivan vastaavalla tavalla, kuten osiossa 2.2 kuvailtu sisäinen diffuusio, joka johtuu



Kuva 8: *Hahmotelma viistediffuusion vaikutuksesta: viisteellä mitattu vapaiden varauksenkuljettajien jakauma ei ole sama kuin sisäinen jakauma*

jakauman pitoisuuseroista. Viiste aiheuttaa ylimääräistä diffuusiota, viistediffuusiota (engl. *carrier spilling*), koska kun materiaalia poistetaan epäsymmetrisesti, pitoisuuserot muuttuvat ja siten varausjakauman tasapaino muuttuu. Näin ollen sisäinen jakauma eikä pn-liitoskohta projisoidu lineaarisesti viisteelle yhtälön (12) mukaisesti. Viistediffuusio on alkuperältään täysin geometrisista syistä johtuva, ja siten myös mittaustekniikasta riippumaton. Geometrisestä syystä johtuvan viistediffuusion lisäksi puolijohdepinnan pintatilat voivat vahvistaa diffuusiota lisää eri tavoilla, koska pintatiloista voi aiheutua ylimääräistä pintavarausta, mikä vaikuttaa myös varausjakauman tasapainoon. Mittaustekniikat voivat myös vaikuttaa viistediffuusion, tärkein vaikutus lienee antureiden kontaktikohtiin kohdistuvalla paineella. [14, 17]

Viistediffuusion vaikutus on havainnollistettu kuvassa 8, missä n_v on viisteellä mitattu varauksenkuljettajien jakauma ja n_s on koskemattoman näytteen sisäinen varauksenkuljettajien jakauma. Puolijohderakenteissa viistediffuusio on vaikutukseltaan voimakkaampi ja tilanteesta riippuen myös vastakkaisuuntainen sisäiseen diffuusion nähden. Viistejakaumassa sähköinen pn-liitoskohta on aina lähempänä pintaa kuin seostusatomien liitoskohta (pahimmassa tilanteessa jopa pinnan ulkopuolella), ja siten jakauma vaikuttaa olevan ohuempi ja jyrkempi kuin sisäinen jakauma. [14] Virheellisesti tulkittuna jakauma näyttää olevan alhaisemmin aktivoitunut kuin mitä se todellisu-

nessa on. Jakauma saattaa myös vaikuttaa olevan korkeammin seostettu kuin sisäinen jakauma. [14] Pahimmassa tapauksessa ero viisteellä havaitun ja todellisen liitoskohtien välillä voi olla jopa kymmenkertainen todellisen liitoskohdan syvyyden suhteen alhaisesti seostetuilla rakenteilla [27]. Näiden lisäksi viistediffuusio voi vaikuttaa myös leviämistä vastustajakaumasta laskettuun neliövastukseen yhtälöä (8) käytettäessä, jota yleisesti käytetään mitatun syvyysjakauman oikeellisuuden tarkistuksessa [14].

Viistediffuusion tarkkaa vaikutusta on vaikea arvioida, sillä siihen vaikuttaa monet asiat monimutkaisilla tavoilla. Se ei myöskään ole rajoittunut vain nykyaikaisiin hyvin pieniin ja korkeasti seostettuihin rakenteisiin, vaan myös useiden mikrometriä syvyisissä ja jopa matalasti seostetuissa puolijohderakenteissa sillä voi olla voimakas vaikutus (suuri Debye-pituus) [14, 27]. Viistediffuusion vaikutusta jakauman rakenteen ja sen muoto, paksuus, jyrkkyys (erityisesti liitoskohdassa), sekä seostuksen pitoisuus, pitoisuuserot (seostus ja alusta), puolijohde pinnan ominaisuudet (pintatilat) ja yllättävästi myös viisteen suunta puolijohderakenteen suhteen [14]. Yleisesti ottaen pn-liitoksellisessa rakenteessa diffuusio on huomattavasti rajumpaa kuin ilman liitosta [14, 47] ja suurilla pitoisuuksilla (yli 10^{18} cm^{-3}) viistediffuusion vaikutus voi olla hyvin pieni (lyhyt Debye-pituus) [14, 29].

Viistediffuusion korjaus, eli Poisson-korjaus, voidaan ottaa huomioon Poissonin yhtälöllä

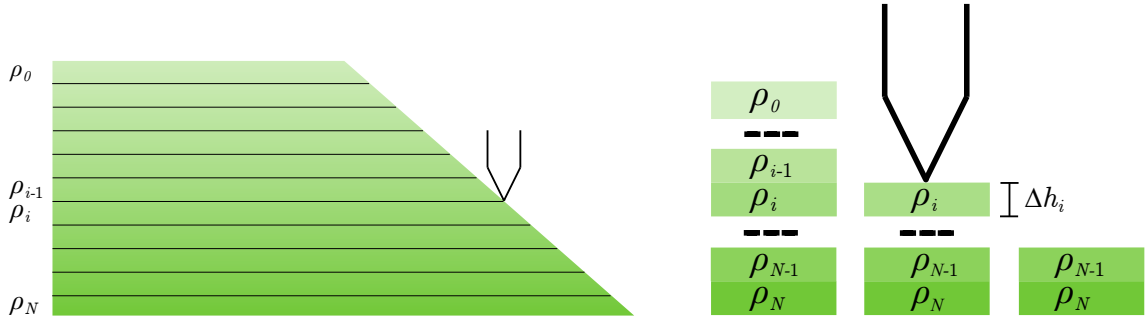
$$\frac{d^2\psi}{dh^2} = -\frac{q_e}{\epsilon} [N_d^+(h) - N_a^-(h) + n_h(h) - n_e(h)], \quad (13)$$

missä ϵ on permittiivisyys ja h on syvyys. [14, 17, 48] Pintatilat ja antureiden paine vaikuttavat Poissonin yhtälön reunaehtoihin ja varauksenkuljettajien yhtälöihin n_h ja n_e , ja näiden lisäksi paine vaikuttaa potentiaalin ψ lausekkeeseen, permittiivisyyteen ϵ ja energia-aukon arvoon (vaikuttaa varauksenkuljettajien luonnolliseen pitoisuuteen). Pintatilat puolestaan voivat vahvistaa viistediffuusion vaikutusta kohti pintaa tai pois päin riippuen materiaalista ja seostyypistä. Pintatilat voivat myös aiheuttaa ns. käänteis- tai tyhjennysaluekerroksen pinnalle riippuen niiden tiheydestä ja puolijohde seostustyyppistä. Käänteiskerroksessa varauksenkuljettajatyypin on vastakkainen

ja tyhjennysaluekerroksessa puolestaan ei ole tai on erittäin vähän vapaita varauksenkuljettajia. Käänteiskerroksen tapauksessa sähköinen pn-liitos voi kadota lähes kokonaan mittauksista, eli vastusjakaumassa ei ilmene liitoksen aiheuttamaa selvää vastusmaksimia (vapaiden varauksenkuljettajien minimiä). Käänteiskerros muodostuu yleensä pienillä pitoisuuksilla (alle 10^{17} cm^{-3}). [14] Varsinaisen pn-liitoskohdan sijainti voi siten olla hyvin vaikea selvittää. Piissä käänteiskerros ilmenee p-tyypin seostuksessa, kun taas germaniumilla se ilmenee n-tyypin seostuksessa [14, 46].

Pintatiloja ja painetta ei kuitenkaan oteta yleensä huomioon ollenkaan, koska se on hyvin vaikeaa tai erittäin aikaavievää [14]. Korjausta ei suinkaan tehdä suoraan lähtien yhtälöstä (13) ja mitatuista SIMS- ja vastusjakaumasta (SIMS tarvitaan arvioimaan seostusatomien jakaumia), vaan vertaamalla Poisson-yhtälön kautta erilaisilla jakauksilla simuloituja ja mittauksesta laskettuja jakaumia toisiinsa [14, 16, 47, 49]. Poissonin yhtälön suora ratkaiseminen (korjauskerroin SRP-mittauksissa) on monimutkaista ja se olisi todennäköisesti hyvin altis numeerisille ongelmille [16, 21].

Korjaus suoritetaan monessa tapauksessa seuraavasti pohjautuen geometriseen viistediffuusioon. Poissonin yhtälöllä (13) voidaan laskea, miltä jokin hyvin perustellusti arvattu (esim. SIMS-mittaus tai simulointiohjelmat) sähköisesti aktivoitujen seostusatomien jakaumat $N_d^+(h)$ ja $N_a^-(h)$ näyttäisivät viistejakaumana. Simuloitua viistejakaumaa verrataan todellisesta mitatusta vastusjakaumasta laskettuun viistejakaumaan (ks. seuraavat osiot). Jos ne ovat tarpeeksi yhteneviä, Poisson-korjattu tulos on ratkaistu (eli simuloitua jakaumaa). Jos ne eivät ole tarpeeksi yhteneviä, edellistä arvattua jakaumaa muokataan siihen asti, kunnes jakauma on ratkaistu. Vertailu voidaan tehdä monella eri tavalla, esimerkiksi koko jakauma kerrallaan tai piste pisteeltä lähtien liikkeelle alustasta. Vapaiden varauksenkuljettajien viistejakauman sijasta voidaan vertailla myös simuloinnilla laskettua ja mitattu vastusjakaumaa toisiinsa. [16, 47, 49] Vertailemalla simuloitua ja todellista mittaustulosta voidaan periaatteessa saada selville eri seostustyyppien atomien ja kuljettajatyypin pitoisuudet.



Kuva 9: Leviämisvastusmittauksen syvyysjakauman laskemisessa käytetty monikerros-malli: näyte ajatellaan koostuvan monesta eri vakioresistivisyyden kerroksista (vasen) siten, että mitattua kerrosta i ylempiä kerroksia ei oteta huomioon (oikea)

3.3.3 Leviämisvastusmittauksen jakauma

Leviämisvastusmittauksessa käytetään osiossa 3.1.2 kerrottua Schumannin ja Gardnerin monikerrosmallia ja korjauskerrointa CF. Kahden kerroksen (alusta ja puolijohderakenne) sijasta puolijohderakenne on jaettu moneksi kerrokseksi kuvan 9 mukaisesti, missä alustan on oletettu alkavan kerroksesta N alaspäin. Yhtälön (5) ja kuvan mukaisesti jokaisesta mittauspisteestä i saadaan yhtälö

$$R_{s,i} = \frac{\rho_i}{2r(\rho_i)} \cdot \text{CF} [\rho_i, \rho_{i+1}, r(\rho_i), s, \Delta h_i].$$

Monikerrosmallissa kerroksien $0 - (i - 1)$ resistiivisyyksiä ei oteta huomioon, mikä voi kuitenkin olla hyvinkin virheellistä johtuen myös ylempien kerrosten vaikutuksesta. [14] Korjauskertoimen ydintermi K voidaan laskea rekursiivisesta yhtälöstä

$$K_i = \frac{\rho_i K_{i+1} + \rho_{i+1} \tanh(2t\Delta h_i)}{\rho_{i+1} + \rho_i K_{i+1} \tanh(2t\Delta h_i)},$$

missä $\Delta h_N \rightarrow \infty$ ja $\rho_N = \rho_{N+1}$ [14, 25, 26].

Syvyysjakauman ratkaiseminen aloitetaan alustasta, koska se on yleensä homogeenisesti seostettu eli $\text{CF} = 1$ ja siten sen resistiivisyys on helposti ratkaistavissa kalibraatiokäyrien avulla. [14] Sen lisäksi korjauskerroin on epälineaarinen, jonka seurauksena seuraavan kerroksen resistiivisyyden arvolle täytyy antaa jokin arvaus (esim. edellisen pisteen pieni muunnelmä), ja lopulta yrittää iteratiivisesti löytää oikea arvo, jolla

mitatun ja lasketun leviämismittauksien arvot ovat tarpeeksi lähellä toisiaan [26].

Ennen syvyysjakauman ratkaisua mitattu vastusjakauma täytyy tasoittaa, sillä tällainen iteratiivinen ratkaisualgoritmi vaatii matemaattisesti hyvin käyttäytyvän jakauman. Tasoituksessa käytetään yleisesti suosittua rajoitettua kuutio-splini -tasoitusalgoritmia (engl. *constrained cubic spline smoothing*), jonka on todettu olevan hyvin käytökelpoinen ja jota käytetään myös tämän työn mittauksissa. [14, 27]

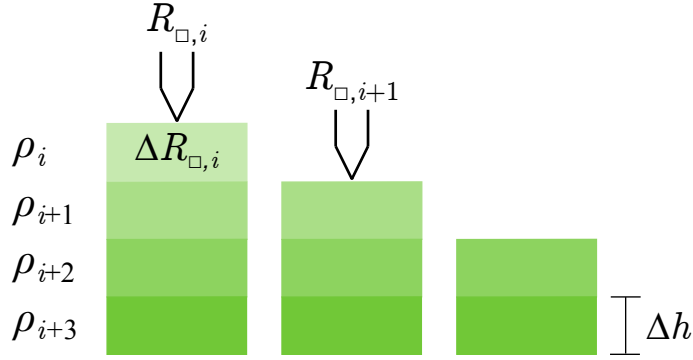
Tällainen suoraan vastusjakaumasta ratkaistu varauksenkuljettajien jakauma on viistejakauma, kuten edellisessä osiossa selvitetään, koska Schumannin ja Gardnerin monikerrosmalli perustuu Laplace-yhtälöön, jossa eri pitoisuusjakaumat $n_v(h)$, $n_s(h)$ ja $N^\pm(h)$ oletetaan olevan täysin samat.

Korjauskertoimen suuruuteen tai pienuuteen vaikuttaa hyvin paljon näytteen rakenne (seostustaso, seostuserojen jyrkkyys ja puolijohderakenteen paksuus), kontaktisäde ja antureiden välinen etäisyys. Käytännössä kontaktisäde on suurin tekijä mittaustuloksissa, joka vaikuttaa korjauskertoimeen nykyisissä puolijohderakenteissa. Esimerkiksi yhden seostusatomien rakenteissa (ei pn-liitosta), joissa jakaumaan jyrkkyys on loivempaa kuin $5\text{--}10\ \mu\text{m}/10\ \text{cm}^{-3}$ korjauskerroin voi olla yksi suurillakin kontaktisäteen arvoilla. Todella ohuissa puolijohderakenteissa (alle 50 nm) korjauskerroin voi olla useita tuhansia tyypillisellä yhden mikrometrin kontaktisäteellä. [14]

Hyvin suuret kertoimet hankaloittavat syvyysjakauman mittausta ja analysointia huomattavasti: mm. eri kerrosten resistiivisyyksillä on suuri vaikutus mitattavaan kerrokseen, ja pienetkin mittausräpälyt vaikuttavat lopputulokseen, koska suuri korjauskerroin keskiarvoistaa mittausta ja siten suuret erot todellisessa jakaumassa ovat pieniä mitatussa jakaumassa [14]. Näiden lisäksi, jos kontaktisäde on rakenteen suhteen suuri, mitattu vastus ei ole täysin leviämismittauksista vaan sitä rajoittaa neliövastus sähkövirran kulkemisen rajoituksesta johtuen [27, 37] (ks. myös osio 3.2.3).

3.3.4 Neliövastusmittauksen jakauma

Kuvassa 10 on tarkemmin esitetty M4PP-syvyysmittauksen perusperiaate. Kuten leviämismittauksissa, niin tässäkin mallissa näyte ajatellaan koostuvan syvyysresoluution Δh paksuisista kerroksista, joilla on vakioresistiivisyys ρ_i ja neliö-



Kuva 10: Neliövastusmittauksen jakaumassa näyte koostuu monesta eri kerroksesta i , joilla on oma resistiivisyys ρ_i ja neliövastus $\Delta R_{\square,i}$. Eri mittauksien $R_{\square,i}$ ja $R_{\square,i+1}$ välisestä erotuksesta voidaan laskea $\Delta R_{\square,i}$, kun eri kerrosten vaikutusta mittauksiin voidaan pitää rinnan kytkentänä (neljä anturia ovat kuvaa kohtisuorassa suunnassa).

vastus $\Delta R_{\square,i}$ [6, 37]. Olettamalla virran kulku rinnan [13] jokaisen anturin kontaktien alapuolella olevien kerrosten läpi, mittaukselle $R_{\square,i}$ saadaan tulos

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\square,i}} &= \frac{1}{\Delta R_{\square,i}} + \sum_{i+1} \frac{1}{\Delta R_{\square,k}} \\ &= \frac{1}{\Delta R_{\square,i}} + \frac{1}{R_{\square,i+1}}, \end{aligned}$$

josta ratkaisemalla $\Delta R_{\square,i}$ ja sijoittamalla neliövastuksen määritelmän yhtälöön (7), voidaan kerroksen i resistiivisyys laskea yhtälöstä

$$\rho_i = \Delta h \cdot \Delta R_{\square,i} = \Delta h \cdot \left(\frac{R_{\square,i+1} \cdot R_{\square,i}}{R_{\square,i+1} - R_{\square,i}} \right). \quad (14)$$

M4PP-syvyysjakauman laskemisessa ei myöskään oteta huomioon kerrosta i ylempiä kerroksia. Yhtälöä voidaan käyttää vain jos neliövastusjakauma on monotonisesti kasvava alaspäin viisteellä kulkiessa [37]. Teoriassa monotonisuuden vaikutus toteutuu puolijohderakenteissa, sillä neliövastuksen määritelmän (7) mukaan neliövastus kasvaa paksuuden pienentyessä ja rakenteet ovat monessa tapauksessa sitä vähemmän seostettuja, mitä syvemmillä neliövastusta mitataan. Mutta johtuen mm. mittaushäiriöistä tai -tarkkuudesta jakauma ei kuitenkaan ole täysin monotoninen, joten myös M4PP-tekniikan tapauksessa tarvitaan hyvää tasoitusalgoritmia.

M4PP-mittauksille ei tiedettävästi ole olemassa (suoraa) korjausta viistediffuusi-oon (Poisson-korjaus), eikä niihin ole muitakaan korjauskertoimia liittyen erityisesti sivuttaissuuntaiseen herkkyyteen, ylempien kerrosten vaikutukseen tai vauriokerrokseen, joten yhtälöä (14) käytetään sellaisenaan ja tuloksena saadaan viistejakauma [6]. Toisaalta M4PP-mittauksissa on kuitenkin esiintynyt huomattavasti vähemmän viistediffuusiota verrattuna perinteiseen SRP-mittaukseen. Ero johtuu todennäköisesti M4PP-mittauksissa käytettävästä pienemmästä paineesta ja että M4PP-tekniikan antureiden vaikutusalue on herkkä kontakteja ympäröivälle epähomogeenisuudelle sekä pinnan karheudelle toisin kuin SRP-mittauksessa. [50]

3.4 Ionisuihkuanalyysitekniikka, SIMS

Erilaisilla ionisuihkumenetelmillä on myös useiden vuosikymmenien historia pintakerrosten analysoimisessa, ja niillä voidaan tutkia alkuainekoostumusta ja sen syvyysjakaumaa. Erityisesti puolijohderakenteiden tapauksessa näillä menetelmillä voidaan saada tietoa seostusatomeista, mutta sähköisesti aktivoituja ei voida kuitenkaan erottaa ei-aktivoituista.

SIMS-tekniikassa (engl. *Secondary Ion Mass Spectrometry*) analysointi tapahtuu pommittamalla tutkittavaa näytettä ioneilla ja näytteestä irtoavia (rekyloituvia) ja ionisoituneita atomeita havaitaan. Pommitettavien ionien energia on keV-energioita, jonka tarkoituksena on saada aikaiseksi näytteen pinnan atomien törmäilyä toisiinsa ja lopulta irtoamista pinnasta (sputterointi). Sputteroinnin tuloksena ja tarkoituksena on muodostaa kuoppa, jonka syvyyden ja alueen sekä havaittujen ionien aikajakauman, ionisointisuhteen ja atomien irtoamisvauhdin perusteella myös syvyystieto voidaan saada selville, koska suurin osa pinnasta irtoavista atomeista on peräisin kahdesta ylimmästä atomikerroksesta. [51] Yleisesti ottaen näytteen atomien ionit voidaan tunnistaa niiden massan ja energian perusteella. Tähän tarkoitukseen käytetään yleisesti sähkö- ja magneettikenttiä, lentoaikamittausta, kaasuionisaatio- tai puolijohdeilmaisimia. [2, 51]

4 Mittaustuloksia

Tässä osiossa käsitellään kokeellisia tuloksia eri mittaustekniikoilla SIMS, M2PP, M4PP ja SRP, sekä myös vertaillaan eri sähköisiä tekniikoita toisiinsa.

Näytteissä rajoituttiin kahteen korkeasti seostettuun, noin 100 nm syvyiseen ja yksinkertaiseen implantointirakenteisiin (p^+n ja n^+p). Leviämisvastusmittauksien vuoksi M2PP-tekniikalla mitattiin myös kalibraationäytteet kullekin seostustyyppille, jota voidaan verrata aiemmin Imecissä mitattuihin perinteisen SRP-tekniikan tuloksiin. Kalibraatiokäyrän lisäksi kalibraationäytteiden mittauksista saadaan myös hyvin perusteellista tietoa itse leviämisvastusmittauksista, tärkeimpänä niistä voidaan määrittää sähköinen kontaktisäde.

Vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuusjakaumia laskettiin ainoastaan p^+n -rakenteelle eri tekniikoilla. Toisesta, n^+p -rakenteesta, ei laskettu pitoisuusjakaumaa, mutta tällaisen rakenteen mitatussa vastusjakaumassa tulisi olla selvä ero sähköisen liitoskohdan suhteen p^+n -rakenteeseen verrattuna, mikä osaltaan antaisi vahvuutta muille kokeellisille tuloksille [14, 46].

4.1 Näytteet

Näytteitä mitattiin yhteensä viisi, ja niiden lyhyt yhteenveto löytyy taulukosta 3, missä rakenteiden paksuudet ovat kalibraationäytteillä koko rakenteen syvyys ja implantointinäytteillä pn-Ge-400C ja pn-Ge-700C paksuus on arvioitu suurin piirtein pitoisuuden 10^{18} cm^{-3} (noin 100-kertainen pienentyminen seostusatomienpitoisuudessa suurimpaan pitoisuusarvoihin verrattuna).

M2PP-mittauksia varten tarvittiin eri kalibraationäytteet. P-tyypin kalibraatinäytteen seosatomina oli boori (B), ja se oli kasvatettu CVD-tekniikalla (engl. *Chemical Vapour Deposition* [8]) Imecissä, ja jossa kerrosten syvyys oli noin 300 nm. N-tyypille oli vastaavanlainen kalibraationäyte, jossa seosatomina oli fosfori (P). [6] Näiden SIMS-jakauma on esitetty kuvissa 15 ja 16.

Kaksi p-tyypin näytettä (p^+n ; ”pn-Ge-400C” ja ”pn-Ge-700C”) olivat alun perin tutkimuksesta [11], missä tutkittiin alumiiniatomien perinteistä ioni-implantointia kitei-

sessä germaniumissa ja implantoinnin jälkeisen lämpökäsittelyn vaikutusta alumiinin diffuusioon ja sähköiseen aktivoitumiseen. Näytteet oli tehty Czochralski-menetelmällä: (100)-kidesuuntaus ja antimoni-seostettuna (n-tyyppi, $\rho > 40 \Omega\text{cm}$, $N_d > 3,7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ [52]). Ioni-implantointi tehtiin 25 keV:n energialla ja $1 \times 10^{15} \text{ cm}^2$ annoksella. Kummatkin näytteet oli implantoinnin jälkeen ensin lämpökäsitelty yhden tunnin ajan 400 °C lämpötilassa perinteisessä uunissa, missä oli kontrolloitu typpikaasuvirtaus. Näyte pn-Ge-700C oli lämpökäsitelty toisen kerran 700 °C lämpötilassa vielä yhden tunnin lisää. Ensimmäisen lämpökäsittelyn tarkoituksena oli korjata ionipommituksessa vaurioitunut germaniumin kiderakenne ja aktivoida seostusatomit. Toisessa lämpökäsittelyssä alumiini-ionit diffundoituvat lisää ja se myös vaikutti seostusatomien sähköiseen aktivointiin. Sähköisiä mittauksia varten näytteiden päälle oli kasvatettu pioksidikerros (10 nm).

n-tyypin näyte (n^+p ; ”np-Ge”) oli peräisin tutkimuksesta [53], missä tutkittiin erittäin lyhytkestoisten lämpökäsittelyjen vaikutusta fosfori-implantoinnin jälkeiseen seostusatomien uudelleenjärjestäytymiseen, diffuusioon ja sähköiseen aktivoitumiseen. Tutkimuksessa (100) p-Ge-alusta, jonka resistiivisyys oli väliltä 0,2–0,5 Ωcm (N_a väliltä $1,7\text{--}0,65 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ [52]) oli implantoitu 30 keV:n energialla ja $3 \times 10^{15} \text{ cm}^2$ annoksella, sekä lämpökäsitelty 20 millisekunnin ajan yhteensä 182 kJ:n energialla. Näytteen päällä ei ollut oksidikerrosta.

Taulukko 3: *Lyhyt yhteenveto germanium-näytteistä*

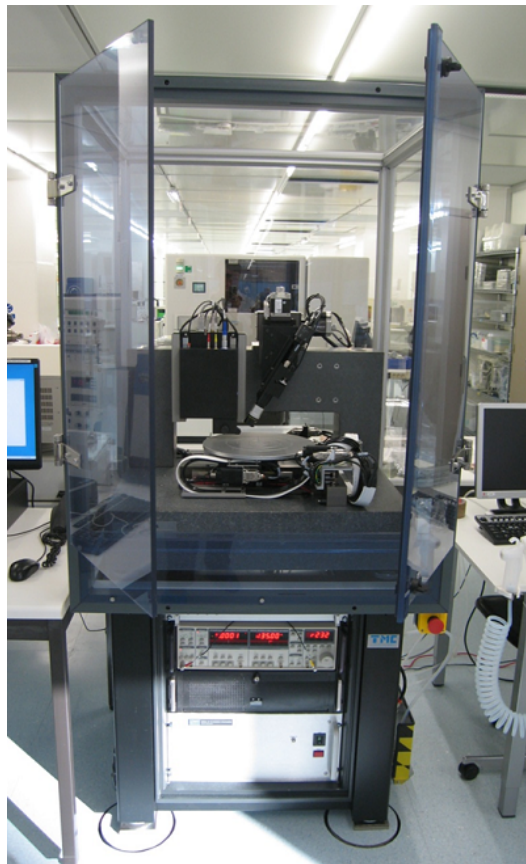
Näyte	Rakenne	Syvyys	Valmistus
p-tyypin kalibraationäyte	$p^{++}p^+pn$	2,5 μm	CVD-kasvatettu
n-tyypin kalibraationäyte	$n^{++}n^+np$	2,0 μm	CVD-kasvatettu
pn-Ge-400C	p^+n	100 nm	Implantoitu, lämpökäs. 1 h 400 °C
pn-Ge-700C	p^+n	120 nm	Implantoitu, lämpökäs. 1 h 400 °C + 1 h 700 °C
np-Ge	n^+p	110 nm	Implantoitu, pikalämpökäsittely

4.2 Laitteisto ja mittaasetukset

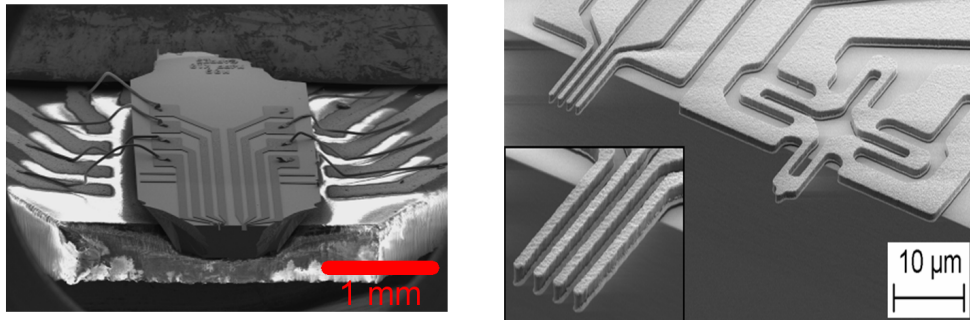
Tämän työn mittaukset keskittyivät ainoastaan vastusjakauman mittauksiin M2PP- ja M4PP-tekniikoilla, joten mittauslaitteesta ja mittauksen suorituksesta kerrotaan tarkemmin. M2PP- ja M4PP-mittaukset olivat hyvin samanlaisia, mutta mittauslaite ei ollut lainkaan suunniteltu kaksipistemittauksia varten. Muilla mittaustekniikoilla (perinteinen SRP, SIMS) tehdyt mittaukset ja saadut tulokset on tehty muiden henkilöiden toimesta tutkimuksissa [6, 11, 53].

4.2.1 M2PP- ja M4PP-laite

M2PP- ja M4PP-mittaukset tehtiin Imec-harjoittelun aikana tanskalaisen Capres-yhtiön [4] valmistamalla MicroRSP M-150 -laitteella (kuva 11). Kuvassa 12 on M4PP-anturi, jossa vierekkäisten, yksittäisten antureiden välinen etäisyys on $1,5\mu\text{m}$. Tämän työn



Kuva 11: Imecin M4PP-mittauslaite (lukuun ottamatta kahta ohjaustietokonetta)



Kuva 12: Vasemmalla Capres-yhtiön valmistaman mikrokokoisen mittausanturin pää ja oikealla suurennos antureista. Neljä lähekkäistä anturia ovat varsinaisia mittauksia varten ja uloin on pinnalle laskeutumista varten. Lähekkäisten johtimien välinen etäisyys on $1,5\ \mu\text{m}$.

mittauksissa käytettiin kuitenkin $10\ \mu\text{m}$ -M4PP-anturia, koska se oli pitkäikäisempi.

Anturit oli tehty monikiteisestä piistä, joka oli päällystetty ohuilla kerroksilla titaania ($10\ \text{nm}$) ja nikkeliä (päällyskerros, $190\ \text{nm}$). Mittauksissa mittausanturit eivät olleet kohtisuorassa näytteen pintaa vasten vaan 30° kulmassa.

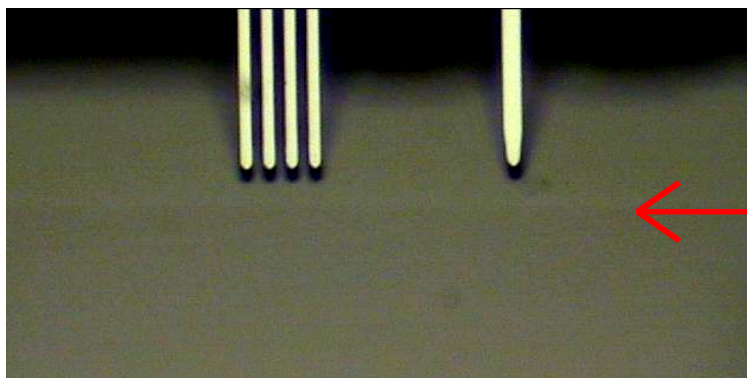
Kuvassa näkyvää muista erillään olevaa anturia käytettiin kunnollisen kontaktin saamiseksi näytteen pinnalle.

4.2.2 Mittausparametrit

Molemmilla mittaustavoilla sähkövirtaa optimoitiin mittauksen aikana siten, että M2PP-mittauksissa jännite pysyi välillä $200\text{--}500\ \text{mV}$ ($500\ \text{mV}$ oli suurin mahdollinen mitattava jännite), ellei toisin mainita, koska näin suurilla jännitteillä mittauksissa esiintyvä kohina oli pienimmillään. M4PP-mittauksissa puolestaan jännite pyrittiin pitämään välillä $1\text{--}25\ \text{mV}$, kuten valmistajalta oli ohjeistettu. Sähkövirran arvoa voitiin säätää väliltä $0,1\text{--}500\ \mu\text{A}$.

Toinen tärkeä parametri oli askelpituus, joka määrää yhtälön (12) mukaisesti mittauksen geometrisen resoluution. Askel voitiin valita väliltä $0,1\text{--}1000\ \mu\text{m}$.

Kosketussyvyys (engl. *engage depth*) vastasi painetta: kun kontakti näytteen pinnalle on saavutettu ylimääräisen anturin avustuksella, laite työnsi anturipäätä kosketussyvyuden verran lisää näytteen pintaa vasten. Koska työntyminen ei tapahtunut an-



Kuva 13: *M4PP-laitteiston valomikroskoopin näkymä 10 μm -M4PP-anturista hieman näytteen pinnan yläpuolella ja viistereunan lähellä. Viistereuna on merkitty nuolella, ja pienillä viistekulmilla reuna näkyy yleensä hyvin heikosti (kuvassa 0,1–0,4°).*

turien pituuden suuntaisesti eikä kohtisuorasti näytteen pintaa vasten, anturit taipuvat ja työntyvät näytteen pinnan päällä, joten kosketussyvyys ei täysin vastaa kohtisuoraista painetta pintaa vasten. Tyypilliset kosketussyvyudet olivat hieman alle tai yli mikrometrin.

Mittauksissa seurattiin myös syötetyn virran ja lukitusvahvistimella mitatun virran välistä vaihe-eroa. Vaihe-ero voi syntyä jos eristävän pn-liitoksen läpi vuotaa sähkövirtaa alustalle, mikä tuottaa epälineaarisen vasteen. Hyvissä mittaustuloksissa vaihe-ero on mahdollisimman pieni. M4PP-mittauksissa mitattiin kahdella eri mittaasetelmalla (ks. kuva 5 sivulla 18), joiden tuloksiin liittyi erityisiä hyväksymissäntöjä, joista kerrotaan enemmän seuraavassa osiossa.

4.2.3 Mittauksen suoritus

M2PP- ja M4PP-mittauksien suorittaminen oli täysin samanlaista, ja ne tehtiin huoneenlämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa. Näyte asetettiin mittauspöydälle, anturipää laskettiin kohti näytteen pintaa, ja sitä voitiin seurata laitteessa olevalla valomikroskoopilla. Kuvassa 13 on valomikroskooppikuva antureista ja viisteestä, pienillä viistekulmilla reuna voi olla hyvin vaikea havaita. Kun anturipää oli tarpeeksi lähellä pintaa, etsittiin seuraavaksi viisteen reuna ja hyvä mittauskohde (ei ylimääräisiä isoja partikkeleita tai säröjä mittausalueen ympäristössä yms.).

Mittauksia ei yleensä aloitettu viisteen reunan kohdalta vaan hieman kauempana viisteestä osiossa 3.3.1 mainituista syistä. Näytettä täytyi yleensä myös kiertää käsin, jotta viisteen reuna oli samansuuntainen kontaktilinjan kanssa. Näiden toimenpiteiden jälkeen mittauslaitteen annettiin tehdä kosketus näytteen pinnalle, mikä tapahtui käyttäen kuvassa 12 olevaa yksittäistä, ylimääräistä anturia. Laskeutuessa laite mittasi jännitettä yksittäisen anturin ja varsinaisten antureiden välillä, ja kun tietty jännitearvo saavutettiin, kontakti oli muodostunut. Kontaktin löytämisen jälkeen mittauslaite painoi anturipäätä kosketussyvyyden verran kohti näytteen pintaa.

Yhdessä mittauspisteessä mitattiin yleensä kahdeksan jännite–virta-paria, jotta mitatut arvot olivat hyviä ja siten mahdollisimman oikeita. Tällainen monen mittaustuloksen käyttö on alun perin M4PP-mittauksia varten: M4PP-mittauksissa neliövastuksen laskemiseksi tarvitaan mittaustulokset kahdelle eri mittausasetelmalle (yleensä A ja C) eli neljä mittaustulosta kummallekin. Joka toisessa mittausparissa mittausantureiden paikkoja vaihdettiin toisikseen (eli mittausasetelmien A ja C tapauksessa myös asetelmia A' ja C' käytettiin, ks. kuva 5 sivulla 18).

Hyvät tulokset muodostavat hyväksytyin parin, ja koko mittaus on hyväksytty, kun mittauspareja on tietyn verran, yleensä viisi tai enemmän (suurin parien lukumäärä kahdeksalle mittaustulokselle on seitsemän). Hyvät tulokset tarkistetaan erikseen kullekin mittausasetelmille: mittaustulokset ovat hyviä, jos niiden poikkeavuus keskiarvosta on tietyn rajan sisällä (yleensä 5 %) ja sähkövirran vaihe-ero on tarpeeksi pieni (yleensä alle 5°). Kun mittaussarja oli valmis, laite nosti automaattisesti anturin ylös, siirtyi askeleen verran seuraavaan pisteeseen ja muodosti kontaktin automaattisesti uudelleen. Neliövastuksen arvo laskettiin siis käyttämällä vain hyväksytyjen mittauspisteiden hyväksytyjen mittausparien keskiarvoja ja käyttämällä van der Pauw -yhtälöitä (10a)-(10c).

M2PP-mittausten tapauksessa edellä mainittuja rajoitteita mittaustulosten hyvyydelle ei voida käyttää, sillä mittauslaite ei ole varsinaisesti suunniteltu tällaisia kaksipistemittauksia varten. Kunkin mittauspisteen tulos on siis keskiarvo kahdeksasta vastuksen arvosta, joiden varianssi oli yleensä hyvin pientä. Kaksipistemittauksissa syötetyn sähkövirran suuntaa muutettiin joka toisessa mittaustuloksessa johtuen mah-

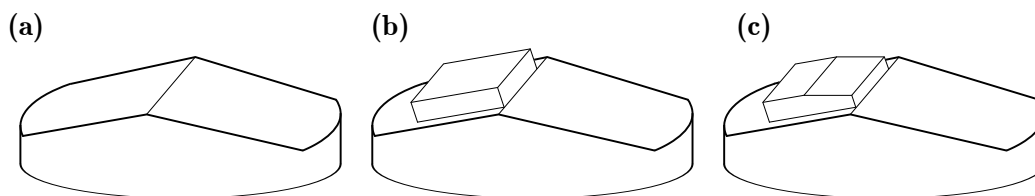
dollisesta metalli–puolijohde-kontaktin epäsymmetrisyydestä. Suunnan muutoksella ei kuitenkaan huomattu olevan merkitystä.

4.2.4 Viiste

Viiste tehtiin käyttämällä pyörivää lasilevyä, jonka päälle oli levitetty öljypohjainen liukaste ja 50 nm:n kokoisia timanttihiukkasia sisältävä tahnaa. Lasilevyssä oli hyvin pieniä rakoja ja koloja, jotka täyttyivät timanttihiukkasista alkuvalmisteluiden aikana, ja siten siihen syntyi hyvin pienirakeinen hiomapinta. Ennen hiomisen alkua näyte liimattiin viistepalikoille (kuva 14 (a) ja (b)), joissa oli jo valmiiksi oma viiste. Hiomisen aikana viistepalikka pidettiin paikallaan käsin erillisen onton tukipalikan avulla siten, että viistepalikka painoi näytettä omalla painollaan hiomispintaa vasten. Tyypillisesti lasin pyörimisnopeus oli noin 50 kpm, ja hionta-aika pienillä kulmilla oli noin 10 kierrosta ja suurilla kulmilla useita kymmeniä kierroksia. Viisteen kulma mitattiin optisella Wyko 3300 -laitteella, sillä viistepalikan kulma ei yleensä vastannut lainkaan hiottua kulmaa, ja jopa täysin tasaisilla viistepalikoilla voitiin saada aikaiseksi yli $0,5^\circ$ viiste. Ennen mittausta näytettä ei poistettu viistepalikalta, joten viistetaso oli samansuuntainen mittauspöydän tason kanssa (kuva 14 (c)).

4.2.5 SRP ja SIMS

SIMS-mittaukset p^+n -näytteille ovat tutkimuksesta [11], ja ne oli tehty Cameca IMS-4f-laitteella, jossa pommitusionina käytettiin happea O_2^+ kolmen kilovoltin energialla ja Al^+ -ioneja mitattiin. Myös perinteiset SRP-mittaukset p-tyyppin näytteille ovat peräisin



Kuva 14: (a) Viistepalikka, jonka avulla hiotaan näytteeseen viiste, (b) näyte liimattu viistepalikalta ja (c) näyte hionnan jälkeen (kokosuhteet ovat liioiteltuja selvyyden vuoksi)

samasta tutkimuksesta, ja ne oli tehty SSM 150 -laitteella, jossa oli käytetty viiden gramman kuormaa, kontaktisäde oli noin $2\ \mu\text{m}$, antureiden välinen etäisyys oli noin $50\ \mu\text{m}$ [28]. Viiste oli tehty edellisessä osiossa kuvaillulla menetelmällä.

Kalibraationäytteiden SRP- ja SIMS-mittaukset oli tehty Imecissä aikaisemmin. SRP-mittauksessa sähköinen kontaktisäde oli noin $1\ \mu\text{m}$ ja antureiden välinen etäisyys noin $40\ \mu\text{m}$. [29]

4.3 Tulokset

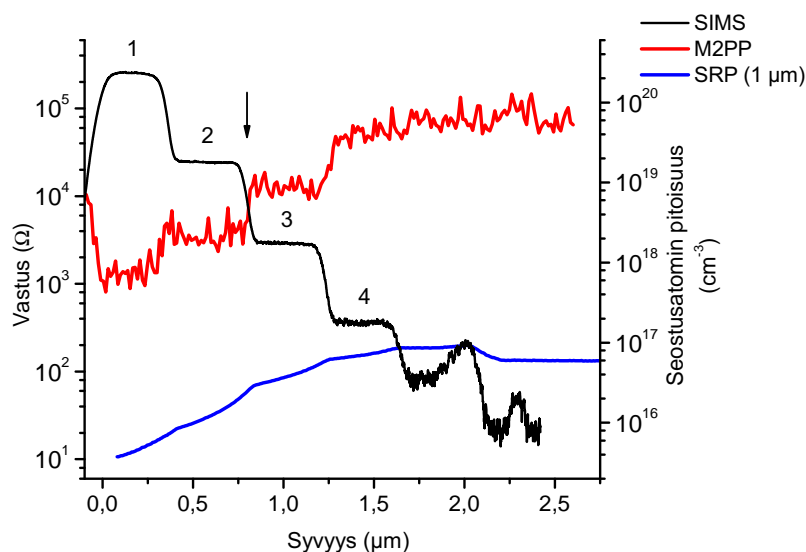
Tässä osiossa esitetään mittaustulokset kullekin näytteelle ja analysoidaan niitä. Jokaisesta näytteestä esitetään varsinaisessa mittauksessa mitatut arvot muutettuna viisteeltä syvyydeksi, mutta ainoastaan p^+n -näytteistä vapaiden varauksenkuljettajien pitoisuusjakaumat on laskettu kaikilla eri tekniikoilla M2PP, M4PP ja SRP.

Kalibraationäytteet mitattiin M2PP- ja perinteisellä SRP-mittaustekniikoilla. Kalibraatiokäyrän $R_s(\rho)$ lisäksi mittauksista saadaan lasketuksi (sähköinen) kontaktisäde. Kontaktisäde on hyvin tärkeä parametri, sillä se on suoraan verrannollinen mittaustekniikan herkkyteen, joka on selvästi nähtävissä M2PP- ja SRP-mittauksissa.

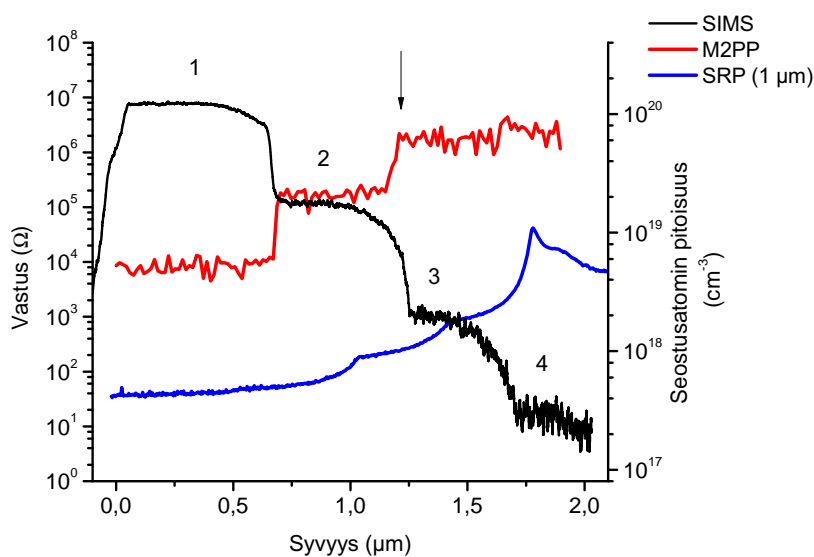
Eri tekniikoiden varauksenkuljettajien jakaumia keskityttiin vertailemaan ainoastaan suurilla pitoisuuksilla (yli $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$), sillä Poisson-korjausta ei tehty lainkaan ja viistediffuusion vaikutus on luultavasti pientä suurilla pitoisuuksilla, seosatomien jakaumien jyrkkyyksillä ja rakenteiden paksuuksilla [14, 29].

4.3.1 Kalibraationäytteiden vastusjakauma ja M2PP-mittauksen kohina

Kuvissa 15 ja 16 ovat tulokset mitatuista vastuksen arvoista kalibraationäytteille M2PP-mittauksissa. Niiden lisäksi kuvaajissa on perinteisen SRP-mittauksen ($1\ \mu\text{m}$ kontaktisäde) vastaava tulos ja kalibraationäytteiden SIMS-jakauma. Eri jakaumat on asetettu vastaamaan toistensa askeleita nuolella osoitetusta kohdasta, ja kuten kuvasta näkyy, SRP-mittauksen tapauksessa SIMS-jakauman ja SRP-askeleiden vastaavuudet oli haasteellista paikantaa. Numeroitujen portaiden resistiivisyydet ja seosatomien pitoisuudet ovat taulukossa 4. Seosatomien pitoisuudet on siis katsottu SIMS-mittauksista ja re-



Kuva 15: *P*-tyypin kalibraationäytteen seosatomien (*B*) SIMS-jakauma ja mitatut M2PP- ja SRP-vastusjakaumat. Eri jakaumat on asetettu vastamaan toisiaan nuolen osoittamasta kohdasta.



Kuva 16: *N*-tyypin kalibraationäytteen seosatomien (*P*) SIMS-jakauma ja mitatut M2PP- ja SRP-vastusjakaumat. Eri jakaumat on asetettu vastamaan toisiaan nuolen osoittamasta kohdasta.

sistiivisyydet olivat ennalta tiedossa. M2PP-mittauksissa korjauskerroin oli 1–1,5 ja SRP-mittauksessa noin 100 [29].

Kummassakin M2PP-mittauksessa kohina on hyvin suurta (huomaa logaritminen asteikko). Aiempien tutkimusten perusteella kohinaa oli saatu hieman pienennettyä,

Taulukko 4: Kalibraationäytteiden SIMS-jakaumien eri portaiden resistiivisyydet ρ ja seostusatomien pitoisuudet N (kuvat 15 ja 16). Resistiivisyyksien arvot oli määritetty ennalta Imecissä.

Porras	p-tyyppi		n-tyyppi	
	ρ (m Ω cm)	N (cm $^{-3}$)	ρ (m Ω cm)	N (cm $^{-3}$)
1.	0,629	$2,2 \times 10^{20}$	0,4257	$1,2 \times 10^{20}$
2.	1,62	$1,8 \times 10^{19}$	1,36	$1,8 \times 10^{19}$
3.	9,63	$1,8 \times 10^{18}$	5,15	$2,0 \times 10^{18}$
4.	50,7	$1,8 \times 10^{17}$	60,73	$2,5 \times 10^{16}$

kun jännite pidettiin mittauksissa yli 200 mV. Se ei ollut riippuvainen pinnan karheudesta (eroa ei havaittu viisteellä eikä koskemattomalla pinnalla). Antureiden käyttöiällä (yleensä vähemmän kuin 3000 kontaktia näytteen pinnalle) eikä eri antureilla tai mittauspäivillä vaikuttanut olevan merkitystä kohinan suuruuteen. Hieman M4PP-tekniikassa käytettyjen kosketussyvyyden arvoja suuremmat arvot (M2PP: 1,25 ja M4PP: 0,3-0,7 μ m) autoivat pienentämään kohinaa vähän, lähinnä vähentämällä huonoja mittauspisteitä. Suuremmat kosketussyvyyden arvot eivät pienentäneet kohinaa lainkaan (17 μ m:iin asti). [54] Kosketussyvyyden pieni merkitys ja leviämistä vastaan riippuvuus kontaktialasta viittaavat siihen, että antureiden (sähköinen) kosketus pinnalle ei ollut hyvin toistettavaa. Tätä tukee myös kunkin mittauspisteen I–V-mittaus tulosten (yleensä 8) pieni hajonta [6, 54].

Kohinaista mittaustulosta voidaan kuitenkin käyttää, jos sen taltuttamiseksi käytetään hyvää tasoitusalgoritmia [6] (ks. implantointimittausten tulokset), sillä seostusjakaumat ovat käytökseltään yleensä hyvin siistejä [2]. Sen lisäksi atomivoimamikroskopiolla (engl. *Atomic Force Microscope* [8]) on huomattu, toisin kuin perinteisillä SRP-antureilla, että M2PP-kontaktijälkien kohdalla ei esiintynyt lainkaan painaumaakaan vaan noin 15 nm-kokoinen ja ylöspäin suuntautuva möykky, jonka epäillä olevan sähkövirran aikaansaamaa pinnan oksidoitumista [6]. Möykyn on todettu myös olevan sitä korkeampi mitä pienempi on kosketussyvyys, eli se siltä osin korreloi suuremman kohinan kanssa. Pinnan oksidoitumisella voi olla vaikutusta pintakosketuksen toistettavuuden kanssa, koska möykky ei liene joka kerralla samanlainen muodoltaan. Oksidoituminen

voi myös vaikuttaa sähkövirran johtumiseen vastaavalla tavalla.

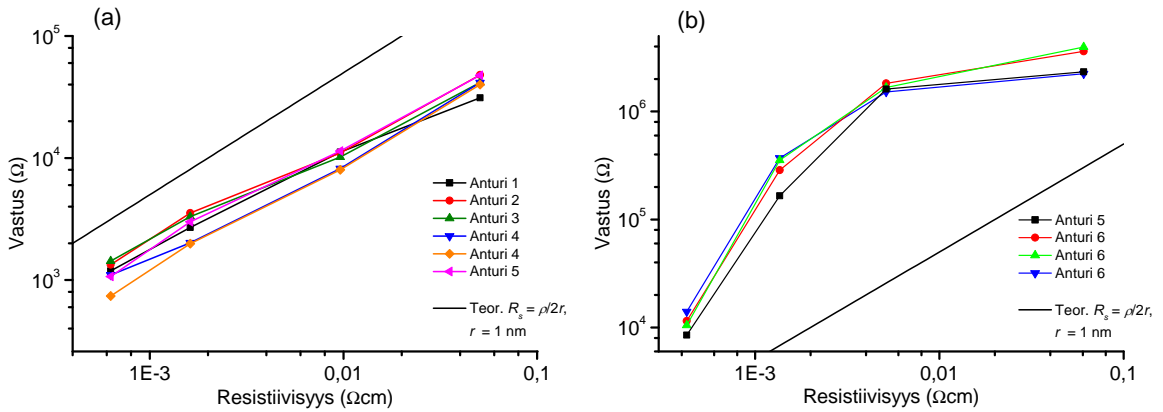
Kohinasta huolimatta M2PP-mittaukset erottautuvat selvästi perinteisestä SRP-mittauksesta. Silmiinpistävin ero on SIMS-jakaumassa nähtävien seostusportaiden selvä havaitseminen ja mukailu M2PP-mittauksessa, kun taas SRP-mittauksessa ne erottuvat todella heikosti. Tämä on hyvin selvä osoitus M2PP-antureiden suuremmasta mittausherkkyydestä, mikä tarkoittaa leviämistämittauksen tapauksessa pientä kontaktisädettä. Mitä pienempi kontaktiala on, sitä pienemmältä alueelta mitattu vastuksen arvo on peräisin. Toisin sanoen koska perinteisen mittauksen kontaktisäde on suuri, alempien portaiden resistiivisyydet tulevat näkyviin. Usean eri resistiivisyysportaan havaitseminen ja erityisesti suurempi kontaktisäde voi johtaa SRP-mittauksissa havaittuihin 100–250-kertaisesti pienempiin vastuksien arvoihin. Alimpien portaiden huono erottuminen on todennäköisesti seurausta viistediffuusiosta (iso Debye-pituus) [6].

Osion 4.3.3 perusteella myös M2PP-mittauksessa tulisi näkyä vastusjakaumassa maksimikohta (pn-liitos), mutta sitä ei kuitenkaan näy. Huipun ilmenemättömyys voi johtua mittauksen lopettamisesta ennen varsinaista liitoskohtaa, joten SPR-mittauksen jakauma voi olla asetettu kuvaan liian lähellä pintaa.

4.3.2 Kalibraatiokäyrät

Kalibraatiokäyrät $R_s(\rho)$ voidaan muodostaa, kun tiedetään kunkin kalibraationäytteen portaiden resistiivisyyksien ja vastuksien arvot. Kalibraationäytteiden resistiivisyyksien ja seosatomien pitoisuuksien arvot löytyvät taulukosta 4, ja käyrät on esitetty kuvissa 17 (a) ja (b). Kalibraatiomittauksista 15 ja 16 portaiden vastuksien arvot on otettu suurin piirtein kohinan keskikohdasta. Vertailun vuoksi mitattujen tulosten lisäksi kuvajissa on myös suora, joka esittää ideaalista, ohmista leviämistätilannetta (ei kontaktivastusta) eli yhtälöä (3), jossa $r = 1$ nm ja jonka log–log–kulmakerroin on yksi.

Imec-harjoittelun aikana tehtiin useita M2PP-mittauksia eri antureilla [54], joiden kalibraatiokäyrät on myös esitetty vertailun vuoksi. Kuten voidaan huomata, mittausten toistettavuus on hyvä kohinasta huolimatta. SRP-mittauksille on normaalia, että



Kuva 17: (a) *P*-tyypin ja (b) *n*-tyypin kalibraationäytteen vastusmittauksista saadut kalibraatiokäyrät $R_s(\rho)$ M2PP-mittauksissa. Kuvissa on myös esitetty usean eri antureiden tuloksia ja vertailun vuoksi teoreettinen kalibraatiokäyrä (yhtälö (3), kun $r = 1 \text{ nm}$).

kalibraatiokäyrät voivat vaihdella eri antureilla ja eri päivinä, joten kalibraatiokäyrät tulisi mitata joka päivä ja joka anturilla erikseen [14]. Toistettavuus on myös ollut hyvä eri mittajien kesken [6].

p-tyypin kalibraatiokäyrä käyttäytyy kohtalaisen lineaarisesti log–log-asteikolla, ja sen log–log-kulmakerroin $k = 0,65\text{--}0,95$ ($R_s \propto \rho^k$), joka on arvioitu käyttäen kaikkia pisteitä (lineaarinen sovitus). Lähellä arvoa yksi olevat kulmakertoimien arvot ovat yleensä olleet merkki kvasiohmisesta kontaktista ja siten myös β -tina-rakenteen muodostumisesta anturin kärkien alla [6,14]. Hiomattomissa *p*-tyypin germanium-näytteissä esiintyy muutenkin ohmisiä metalli–puolijohde-kontakteja [55].

Kontakti hiomattomaan *n*-tyypin germaniumiin on tiedettävästi hyvin epäohminen, kontaktimetallista riippumatta, ja kontaktivastus on myös ollut suuri (pinnalle muodostuu *p*-tyypin käänteiskerros, ks. osio 3.3.1) [55,56]. Epäohmisuus, tässä tapauksessa epälineaarisuus log–log-asteikolla, on selvästi nähtävissä tämän työn tuloksessa myös hiotulla viestepinnalla. Toisaalta epälineaarisuus vaikuttaa olevan vakavaa ainoastaan kahden oikeanpuolimaisen pisteen perusteella. Ero näiden kahden pisteen seostuksessa on 100-kertainen (2×10^{18} ja $2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ja $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ on hyvin johtava seostuspitoisuus, eli myös *n*-tyypin germaniumissa näyttäisi esiintyvän (kvasi)ohminen kontakti suurilla seostuspitoisuuksilla. Mutta lineaarisella alueella log–log-kulmakerroin on 1,4–

2 eri pisteiden välillä, ja kulmakertoimen arvot ovat suurempia kuin mitä perinteisen SRP-mittauksien tapauksessa yleensä esiintyy [14]. Molemmat ovat merkkejä suuresta kontaktivastuksesta ja epäohmisuudesta. Kontaktivastuksen vaikutus näkyy myös tarkastellessa mitattujen käyrien suhdetta teoreettiseen käyryyn: Kulmakertoimen ja suurempien mitattujen vastusarvojen perusteella laskettu kontaktisäde olisi ainakin 10-kertaisesti pienempi kuin 1 nm. Näin pieni säde ei ole realistinen tulos, varsinkin kun todellinen, fyysinen kontaktijälki on noin 50 nm p-tyypin germaniumissa [6].

Myös p-tyypin tapauksessa esiintyy kontaktivastusta, kuten log–log-kulmakerroin antaa ymmärtää, mutta sen vaikutus on ilmeisesti huomattavasti pienempi kuin n-tyypin germaniumissa. Todellinen sähköinen kontaktisäde lasketaan ottamalla ensin huomioon kontaktivastus. Kontaktivastus on mitatun kalibraatiokäyrän ja ns. kontaktikalibraatiokäyrän erotus (ks. osio 3.1.2). Kontaktikalibraatiokäyrä on monien koekellisten tutkimusten perusteella puolet mitatusta kalibraatiokäyrästä, ja tällöin kontaktivastukseksi saadaan 0,5–25 k Ω eri mittauspisteistä laskettuna. Varsinainen kontaktisäde lasketaan kontaktivastuksen erotuksen jälkeen yhtälön (3) mukaisesti, missä $r = r(\rho)$ on siis riippuvainen kontaktien alla olevasta resistiivisyydestä [14, 29]. Sähköiseksi kontaktisäteeksi saadaan p-tyypin tapauksessa 5–15 nm, jotka osaltaan vastaavat 70–200-kertaa suuremman kontaktisäteen (1 μm) omaavan SRP-mittauksen noin 100–250-kertaisesti pienempiin vastuksen arvoihin.

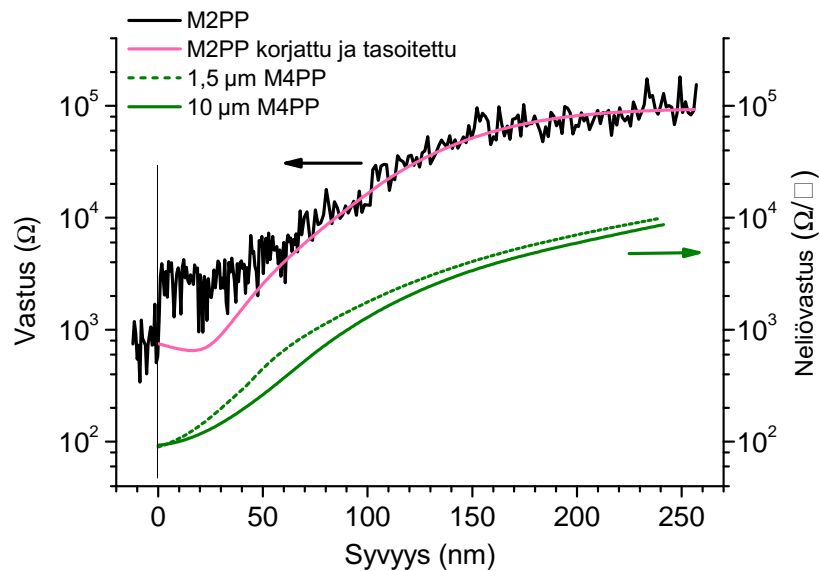
Sähköisen kontaktisäteen arvo n-tyypin germaniumissa on vaikeampi laskea, sillä siihen ei voi soveltaa samaa laskutapaa kuin p-tyypin tapauksessa johtuen kontaktivastuksen selvästi korkeammasta kuin 50 prosentin vaikutuksesta mitattuun vastuksen arvoon (mitatut vastuksen arvot p-tyypissä ovat 10–100-kertaisesti pienempiä). Tässä tapauksessa kontaktivastuksen laskeminen vaatisi muita keinoja, joihin kuuluu mm. tunnettujen rakenteiden laskeminen optimoimalla kontaktisäteen arvoa ratkaisualgoritmeissa, vertailua 4PP-mittauksiin ja pinnan ominaisuuksien tutkimista [14].

4.3.3 Implantointinäytteet: vastusjakaumat

Kuvissa 18, 19 ja 20 on esitetty mitatut vastusjakaumat näytteille pn-Ge-400C, pn-Ge-700C ja np-Ge. Näyte pn-Ge-400C oli mitattu myös 1,5 μm -M4PP-anturilla Bri-

gitte Parmantierin toimesta (Imec). Kaikki paitsi näytteen np-Ge M2PP- ja M4PP-mittauksia ei jatkettu pidemmälle, koska (Imec-harjoittelun) mielenkiinnonkohteiden syvyydet olivat tiedossa ennalta käsin eikä alustaa ollut mielenkiintoista mitata liian pitkään ajansäästön vuoksi. Näytteen np-Ge M4PP-mittausta ei voitu enää jatkaa kuvassa olevaa pistettä pidemmälle, sillä jännitteet ylittävät arvon 500 mV (mittauslaitteen jännitemaksimi) pienimmällä mahdollisella sähkövirran arvolla.

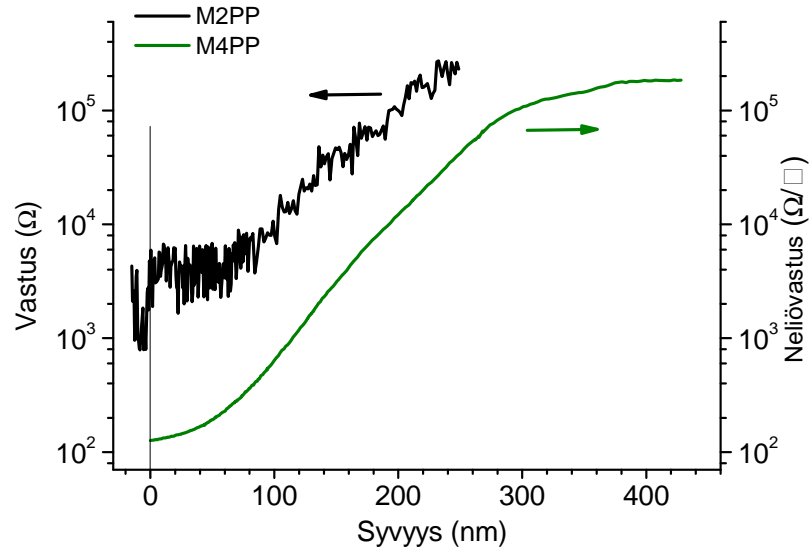
p-tyypin näytteiden oksidikerroksesta huolimatta M2PP-mittausten aloituskohta on määritelty alkavan pystyviivalla merkitystä kohdasta, sillä mitattujen vastuksien arvot ennen merkittyä kohtaa ovat samoja kuin kaukana viisteen reunasta mitatut arvot ja nollakohdassa ilmenee hyvin suuri ja jyrkkä kasvu mitatussa vastuksessa [6]. Tämä on SRP-mittauksissa tuttu ilmiö (ks. osio 3.3.1) ohuiden puolijohderakenteiden tapauksessa, joka johtuu viisteen pintavauriosta ja johtavan materiaalin hiomisesta pois. Mittauspisteitä oli kertynyt jo ennen viistereunaa, koska huonolaatuisen oksidikerroksen läpilyöntikestävyys oli luultavasti ylittynyt [6]. Kuvassa 18 on myös esimerkki pintavauriosta korjatusta ja tasoitetusta vastusjakaumasta (Trudo Clarysse, Imec, Imecprof-ohjelma). Pintavaurio on osion 3.3.1 mukaisesti nollakohdan molemminpuolisten mitattujen (”tasaisten”) vastustasojen erotus. Kuvassa 20 on toinen esimerkki



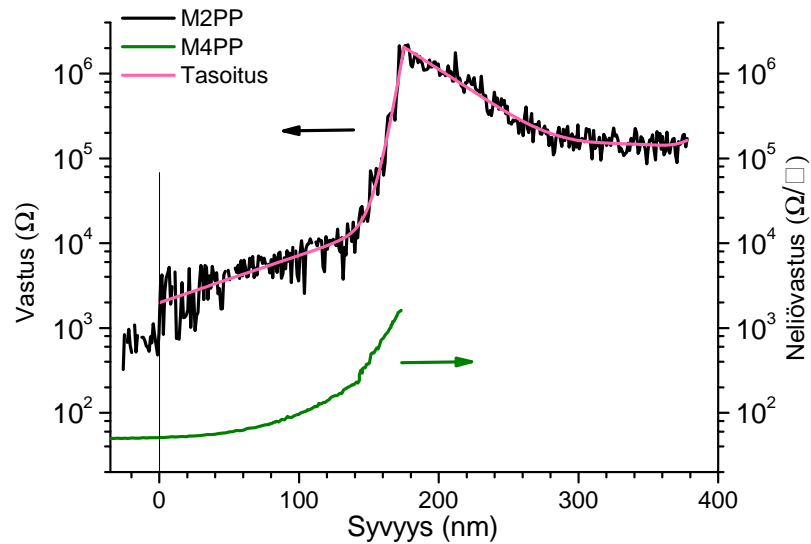
Kuva 18: Näytteen pn-Ge-400C mitatut leviämis- ja neliövastusjakaumat. Kuvassa on myös esitetty viistevauriosta korjattu ja kohinasta tasoitettu M2PP-vastusjakauma.

tasoituksesta, johon ei ole tehty korjausta. Kohinan vaikutusta voidaan kiertää huomattavasti käyttäen hyvää tasoitusalgoritmia.

Kaikkien näytteiden M2PP- ja M4PP-mittauksissa on huomattava ero kohinassa (huomaa sama asteikko molemmissa). Tämä ero antaa lisää osoitusta kohinan liittymisestä kontaktin toistettavuuteen, koska M4PP-mittauksissa kontaktilla tai sen alalla



Kuva 19: Näytteen *pn-Ge-700C* mitatut leviämisen- ja neliövastusjakaumat



Kuva 20: Näytteen *np-Ge* mitatut leviämisen- ja neliövastusjakaumat, sekä kohinasta tasoitettu leviämisvastusjakauma, jossa viistevauriota ei ole otettu huomioon

ei ole suurta merkitystä neliövastusta mitattaessa, kun taas M2PP-mittauksissa se on hyvin oleellinen osa mitattua vastusta. Mutta toisaalta M4PP-laitetta ei ole optimoitu alun perinkään M2PP-mittauksia silmällä pitäen (esim. materiaalit tai elektroniikka).

Kuvassa 18 nähdään myös selvä ero erikokoisten M4PP-antureiden tuloksissa. Pienemmällä anturilla mitattu vastus on suurempi ja jakauma jyrkempi kuin suuremmalla anturilla. Ainoastaan pinnan läheisyydessä mitatut neliövastuksen arvot ovat hyvin lähellä toisiaan, koska kummatkin anturit mittaavat koko puolijohderakenteen neliövastusta, joka voidaan mitata tarkasti kummallakin anturilla. Muussa tapauksessa tämän kaltainen tulos on täysin odotettavissa pienemmän anturin noin 7-kertaisesti pienemmästä herkkyydestä johtuen. Isompi anturi keskiarvoistaa ympäröiviä resistiivisyyseroja, josta aiheutuu pienemmän vastuksen arvot ja loivempi jakauma.

Kuvissa 19 ja 20 tulee esille eri rakenteiden p^+n ja n^+p ero sähköisen liitoskohdan näkymisessä viistemittauksissa. P-tyyppin näytteessä seostusatomien liitoskohta oli noin syvyydellä 300 nm, ja sähköisissä mittauksissa pn-liitos ilmenee jakauman loiventumana syvyydeltä 260 nm alkaen. Tarkka pn-liitoskohdan sijainti on siten hyvin vaikea saada selville.

n-tyyppin rakenteella puolestaan liitoskohta on hyvin selvästi näkyvässä terävänä maksimikohtana kuvan 20 vastusjakaumassa. Seostusatomien liitoskohdasta ei ole tietoa n-tyyppin näytteen tapauksessa, mutta se voi olla jopa muutamia kymmeniä nanometrejä syvemmällä [14]. Huomattavaa on myös M4PP-mittauksen kykenemättömyys mitata kuvassa olevaa pistettä pidemmälle, mikä on myös merkki sähköisestä liitoskohdasta ja että sen jälkeen alkaa alustakerros (alhainen seostuspitoisuus). M2PP- ja M4PP-mittausten sähköiset liitoskohdat on esitetty olevan samalla syvyydellä visuaalisista syistä, koska M2PP-tekniikan viistediffuusion vaikutuksesta, etenkin verrattuna M4PP-mittauksiin, ei ole tutkittu eikä viistereunan paikasta ole tarkkaa tietoa (ei oksidikerrosta).

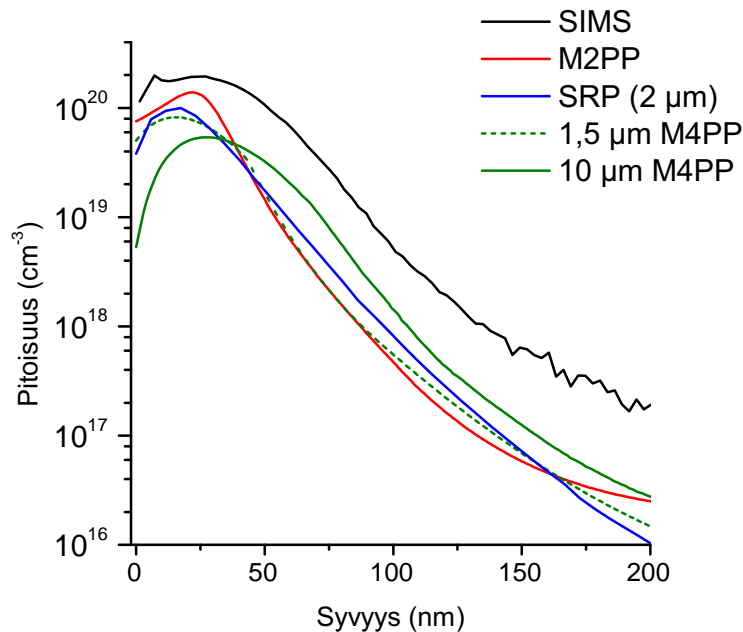
Sähköisen liitoskohdan selvä näkyminen ja näkymättömyys on tuttu ilmiö myös perinteisen SRP-tekniikan tapauksessa [14], ja tällainen käyttäytyminen on hyvin viittaava osoitus käänteiskerroksen olemassaolosta. Käänteiskerros on seurausta germaniumin pinnan pintatiloista (ks. osio 3.3.1) alhaisesti seostetulla alueella, kuten näytteiden pn-

Ge-400C ja pn-Ge-700C tapauksessa alusta oli. Käänteiskerroksesta johtuen näytteen rakenne viisteellä on muodollisesti p^+p^- , eli varsinainen n-tyypin alusta on p-kerroksen alapuolella ja siten näkymättömissä.

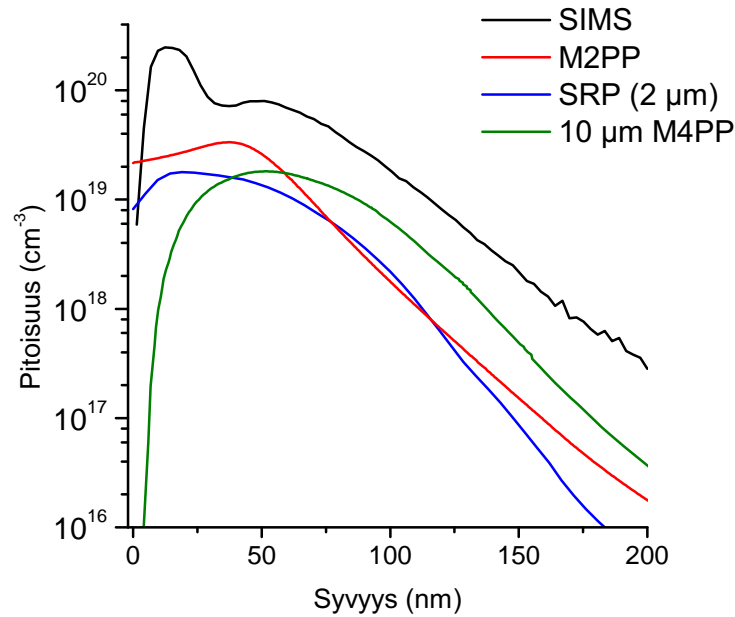
4.3.4 Implantointinäytteet: varauksenkuljettajien jakaumat

Vapaiden varauksenkuljettajien jakaumat laskettiin osion 3.3 mukaisesti näytteille pn-Ge-400C ja pn-Ge-700C, ja ne ovat kuvissa 21 ja 22. M2PP- ja M4PP-jakaumat ovat Trudo Claryssen (Imec) laskemia 1,5 μm -anturin jakaumaa lukuun ottamatta, jonka oli laskenut Brigitte Parmantier (Imec). M2PP-jakaumien laskemisessa oli käytetty Imecprof-ohjelmaa, ja muut jakaumat ovat tutkimuksesta [11]. Jakaumat on näytetty ainoastaan syvyydelle 200 nm saakka, sillä suurin vaikutus sähkönjohtavuuteen on lähinnä suuren seostuspitoisuuden alueella (yli 10^{18} cm^{-3}), viistediffuusiota ei oltu otettu huomioon eri tekniikoilla eikä SIMS-mittauksessa näkynyt alle 10^{17} cm^{-3} pitoisuuksia.

Normaalista käytännöstä poiketen liikkuvuuden μ arvot ovat peräisin tutkimuksesta [11], jossa mitattiin liikkuvuuden arvoja p-tyypin puolijohderakenteissa. Yleensä



Kuva 21: Näytteen pn-Ge-400C seostusatomien (Al) ja vapaiden varauksenkuljettajien jakaumat eri tekniikoilla mitattuna



Kuva 22: Näytteen *pn-Ge-700C* seostusatomien (*Al*) ja vapaiden varauksenkuljettajien jakaumat eri tekniikoilla mitattuna

liikkuvuuden arvot ovat peräisin mittauksista, jotka on tehty huomattavasti paksumilla, homogeenisilla germanium-näytteillä [14]. Tutkimuksen [11] tulosten perusteella erot liikkuvuuden arvoissa eivät ole merkityksellisiä germaniumin paksuuden suhteen.

Aivan ensimmäinen ja hyvin tärkeä osoitus M2PP-tekniikan käytettävyyden kannalta on se, että lasketut varauksenkuljettajien jakaumat eivät ylitä SIMS-jakaumia. SIMS mittaa seostusatomien kokonaispitoisuutta ja seostusatomit lisäävät yleensä materiaaliin vain yhden ylimääräisen vapaan varauksenkuljettajan per atomi, joten SIMS-jakauman ylittäminen sähköisessä mittauksessa olisi ongelmallista. Mittaustulosten perusteella näin ei kuitenkaan ole. Toisaalta varsinkin näytteen *pn-Ge-400C* tapauksessa laskettu jakauma voi periaatteessa ylittää SIMS-jakauman suuren kohinan epätarkkuuden ja jakaumien pienen eron takia, etenkin M2PP-jakauman huippukohdassa.

Kuten kuvaajista voidaan havaita, kaikki seostusatomit eivät ole sähköisesti aktivoituja yhdenkään mittaustuloksen perusteella, ja aktivoituminen vaikuttaa pienentyvän, mitä enemmän näytettä on lämpökäsitelty. Tutkimuksessa [11] toisen, 800 °C-asteen lämpökäsittelyn jälkeen aktivoituminen putosi jopa vain yhteen prosenttiin korkean

seostuksen alueella. Näin suuri sähköisten mittaustekniikoilla mitattujen jakaumien ero SIMS-jakaumaan ei voi olla viistediffuusiosta johtuvaa varauksienkuljettajien pitoisuuksien tasoittumista, vaan syynä on jokin muu tekijä. Tutkimuksessa [11] syyksi arvellaan ioni-implantoinnissa aiheutuneita vauriota, jotka hidastavat seostusatomien diffuusiota lämpökäsittelyvaiheessa ja sähköistä aktivointia.

Lähtökohtaisesti M2PP-tekniikka on teoreettisesti herkempi kuin perinteinen SRP-tekniikka (ero kontaktisäteessä 70–400-kertainen), mikä oli jo havaittavissa suoraan kalibraationäytteiden portaiden mittauksissa (osio 4.3.1). Implantointinäytteiden mittauksissa pienempi sähköinen säde näkyi korjauskertoimen arvoissa: M2PP-mittauksessa se oli 1–1,5, kun taas SRP-mittauksessa se oli arviolta 200–500 [29]. Pienempi herkkyys on myös havaittavissa jakaumissa: M2PP-jakaumat ovat SRP-jakaumien suhteen suurempia pitoisuuksiltaan ja myös jyrkempiä, etenkin suuresti seostetulla alueella (yli $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) – tämä on juuri odotettavissa oleva tulos suhteessa suuremman herkkyyden anturiin, koska suurempi anturi keskiarvoistaa pitoisuuseroja, josta seuraa pienempi pitoisuustaso ja loivempi jakauma. Mutta toisaalta jos viistediffuusio on jostain syystä voimakkaampi kuin SRP-mittauksen tapauksessa, se voi myös vaikuttaa vastaavalla tavalla: sen myötä jakauma voi vaikuttaa ohuemmalta ja loivemmalta kuin mitä se oikeasti on, sekä se voi myös kasvattaa pitoisuutta [6]. Viistediffuusion vaikutusta ei ole kuitenkaan tutkittu lainkaan M2PP-tekniikan tapauksessa.

M2PP-mittauksien jakaumista lasketut koko jakauman neliövastuksien (yhtälö (8)) arvot olivat noin 2 ja 10 % (pn-Ge-400C ja pn-Ge-700C) pienemmät kuin M4PP-pintamittauksien tulokset (77 ja $117 \Omega/\square$), kun taas SRP-neliövastukset yliarvioivat neliövastusta noin 6 ja 28 % [6]. M2PP-tulokset ovat siis erityisen hyviä jälkimmäisen näytteen kohdalla ja kohtalaisen hyvä myös toisen näytteen tapauksessa, ja SRP-mittauksen tulos ei ole yhtä hyvä enää jälkimmäisen näytteen kohdalla. Koko jakaumasta laskettujen neliövastuksien arvojen perusteella on hieman vaikeaa sanoa, millä tavalla M2PP- ja SRP-jakaumat ovat oikeassa tai väärässä toistensa ja sisäisen jakauman suhteen. Erot korkean seostuksen alueella (yli 10^{18} cm^{-3}) luultavasti vaikuttavat neliövastukseen hyvin paljon, koska alue on paksu ja jakauman laskuosa on kohtalaisen jyrkkä, joten tällaisella perusteella M2PP-mittaukset vaikuttavat hieman yliarvioivan

ja SRP-mittaukset puolestaan aliarvioivat pitoisuutta sisäiseen jakaumaan verrattuna. Mutta M2PP-mittauksen tapauksessa noin pienet erot, 2 ja 10 %, voivat johtua suuresta mittauskohinasta aiheutuvasta epätarkkuudesta.

Pienemmän M4PP-anturin tulos on hyvin samanlainen SRP-jakauman kanssa. Pienet erot jakauman laskuosassa voivat liittyä tekniikoiden erilaisiin herkkyyksiin (SRP-tekniikassa herkkä kontaktien kohdalla, M4PP-tekniikka enemmän kontaktien ympäristölle), tai viistediffuusion erilaisista vaikutuksista, mutta näin pienillä eroilla ei liene merkitystä esimerkiksi koko jakauman neliövastusta laskettaessa. Pienemmällä M4PP-anturilla voidaan tämän perusteella mitata yhtä hyvin kuin perinteisellä SRP-tekniikalla.

Suuremman M4PP-anturin tulos poikkeaa selvästi muista jakaumista, erityisesti pienemmän anturin tuloksesta. Pienemmän anturin suhteen suurin osa erosta johtunee suuremman anturin hieman yli 10-kertaisesti suuremmasta herkkyydestä. Näytteen pn-Ge-400C tapauksessa 10 μm -anturin jakauman maksimipitoisuus on muita alempi, se on hyvin paljon pyöristynyt lähellä pintaa ja jakauma on kokonaisuudessaan muita hieman paksumpi. Toisen näytteen tapauksessa M4PP-jakauman ongelmana on myös suuri pyöristyneisyys lähellä pintaa, mutta muuten se olisi SRP-mittauksen kanssa samanlainen.

Pyöristyneisyys oli luultavasti seurausta anturin suuresta koosta suhteessa mittaavaan rakenteeseen, ja viisteen pyöristymisestä, joka on voinut yltää varsinaisen näytteen asti oksidikerroksesta (10 nm) huolimatta [37]. Kummankin näytteen päällä oli oksidikerros, joten jakauman aloituskohta oli melko tarkasti myös näytteen aloituskohta. Pyöristyneisyys ei luultavasti ollut seurausta oksidikerroksen periksiantamisesta, ja siten mittauspisteitä ei olisi ollut ennen varsinaisen näytteen alkua, koska mittauksissa jännite pysyi alle 25 mV. Sillä ei myöskään olisi ollut noin suuri vaikutus pitoisuuden alentumisessa, kuin mitä jakaumassa nähdään lähellä pintaa. Suuremman M4PP-anturin jakauma voitaisiin siirtää, mutta varsinkin ilman muiden jakaumien apua siirtäminen ei ole kovin tarkkaa; siirto voitaisiin periaatteessa tehdä mielivaltaisesti väliltä 0–50 nm, missä 50 nanometrin siirto veisi maksimipitoisuuden pinnan kohdalle. Jakauman laskuosa vaikuttaa kuitenkin olevan hyvin samanlainen muiden tulosten kanssa kummankin näytteen tapauksessa. Suurempaa anturia voitaisiin luultavasti kuitenkin

käyttää hieman paksumpien jakaumien mittauksiin, joissa pyöristyneisyys lienee pienempi, yhtä hyvin kuin perinteistä SRP-tekniikkaa. Näiden lisäksi suuremman M4PP-anturin tulos antaa viitteitä myös siitä, miksi perinteistä 4PP-anturia ei ole käytetty syvyysjakaumien mittauksiin (antureiden koko jopa 200–1 000 μm).

5 Loppuyhteenveto

Tässä työssä nähdään hyvin vahvoja viitteitä pienempien, mikrokokoistettujen mittausantureiden paremmista ominaisuuksista ja tuloksista perinteisten sähköisten mitaustekniikoiden suhteen erilaisilla germanium-puolijohderakenteilla. M2PP- ja M4PP-tekniikoiden anturit ovat useita kymmeniä, jopa useita satoja kertoja pienempiä perinteisten SRP- ja 4PP-mittausten antureiden suhteen, ja siten (teoreettisesti) huomattavasti herkempiä kuin perinteiset tekniikat.

Vaikka M2PP-mittauksissa esiintyi hyvin suuri määrä mittauskohinaa, tekniikan pieni (sähköinen) kontaktisäde tuli selvästi esille jo kalibraationäytteen kanssa ja myös viitteitä siihen saatiin ohuiden puolijohderakenteiden jakaumissa verrattuna perinteisen SRP-tekniikan jakaumiin (jakauman muodot, korjauskerroin). Vaikka Poisson-korjausta ei oltu otettu huomioon, erot M2PP- ja perinteisen SRP-tekniikoiden välillä luultavasti pysyvät vastaavanlaisina, koska korjausta ei tehty kummassakaan tapauksessa eikä korkean seostuksen alueella viistediffuusiolla luultavasti ole mullistavaa merkitystä tuloksien kannalta. Ainoastaan kontaktipaine on erilainen eri tekniikoilla (pienempi M2PP-tekniikalla), joka tuonee kontaktisäteestä riippumatonta eroa jakaumiin. Sen vaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida ilman muita tutkimuksia, mutta esimerkiksi M4PP-tekniikalla viistediffuusio on ollut huomattavasti pienempi kuin perinteisellä SRP-mittauksella ainakin osittain pienemmän kontaktipaineen johdosta [50].

Mittauskohinaa voitiin taltuttaa hyvällä tasoitus algoritmilla. Siitä huolimatta tasoitus ei ole ongelman ratkaisu, koska kohina oli sen verran suurta, että tasoitus ei välttämättä tuo esiin kohinan peittämiä yksityiskohtia. Kohinan syy on todennäköisesti ero kontaktialueessa jokaisen mittauspisteen välillä, koska M2PP-tekniikan mittaama vastuksen arvo on hyvin paljon riippuvainen kontaktialasta eikä M4PP-mittauksissa kohinaa esiintynyt. Kohinan vaikutusta voitaisiin yrittää pienentää esimerkiksi mittaamalla näyte useamman kerran samasta kohdasta (keskiarvoistus), kokeilemalla muita anturimateriaaleja, optimoimalla mittauselektroniikkaa (joka on optimoitu alun perin M4PP-tekniikalle) ja estämällä (oletettua) sähköön aikaansaamaa pinnan oksidoitumista.

Mittauskohinan lisäksi n-tyyppin germaniumissa esiintyi epäohmista käyttäytymistä ja suuri kontaktivastuksen vaikutus (myös suhteessa leviämistä vastukseen), joista molemmat ovat olleet ongelmallisia n-tyyppin germaniumin käyttämisessä transistoreissa. Epäohmisuus ja suuri kontaktivastus johtunevat suuresta määrästä pintatiloja. Tässä työssä pintatilojen vaikutuksesta nähtiin viitteitä eri rakenteiden p^+n ja n^+p vastusjakaumissa, joissa pn-liitos ilmeni joko hyvin epäselvästi (M4PP) tai erittäin selvästi (M2PP ja M4PP).

Epäohmisuus, suuri kontaktivastus ja pintatilat vaikeuttavat huomattavasti varauksenkuljettajien jakaumien laskemista, koska huonoimmassa tapauksessa kontaktivastus täytyy selvittää erikseen ja pintatilat vaikuttavat pn-liitoksen näkyvyyden lisäksi viistediffuusioon. Toisaalta koska kontaktisäde oli lähellä arvoa yksi (paksummilla puolijohderakenteilla se onkin), tuntematon resistiivisyys voidaan periaatteessa ratkaista kalibraatiokäyrien kautta eikä kontaktivastuksesta tarvitse ottaa huomioon. Tällainen menettelytapa ei ole täysin tarkka, vaikka korjauskerroin olisi lähellä arvoa yksi, eikä se ota huomioon muita laskualgoritmien mahdollisia korjauksia. Sen lisäksi mitattava näyte täytyy valmistella samalla tavalla kuin kalibraationäytteen viiste, jotta kontaktivastus ja mittaus olisivat yhteneväisiä kalibraationäytteiden mittausten kanssa. Epäohmisuus ja kontaktivastuksen suuruus on saatu muissa tutkimuksissa pienennettyä viisteettömällä pinnoilla ja kiinteillä kontakteilla [55–57], ja näitä tuloksia voitaisiin soveltaa osittain myös antureiden tapauksessa (esimerkiksi germanium-pinnan käsittely). p-tyyppin germaniumissa osa tuloksista oli (kvasi)ohmisia, vaikka myös p-tyyppissä kontaktivastus ei ollut kuitenkaan täysin merkityksetöntä.

Pintamittauksessa M4PP-tekniikka on jo aikaisemmin osoittanut olevan erittäin herkkä, ja anturit ovat tarpeeksi pieniä, jotta tekniikkaa voidaan käyttää myös syvyysjakauman mittaukseen. Syvyysjakauman mittauksista nähtiin, että M4PP-mittaukset olivat yhtä hyviä kuin perinteiset SRP-mittaukset. Sen lisäksi kahden erikokoisen (yli 10-kertainen ero koossa) mittauksissa tuli selvästi esille, että koolla on väliä 4PP-tekniikankin kanssa ja että tarpeeksi pieni anturi on täysin tarpeen ohuiden puolijohderakenteiden analysoimisessa. Suuremman anturin jakaumassa oli useita suuria eroavaisuuksia muiden mittausta jakaumiin, joita ei enää esiintynyt pienemmän anturin

tuloksessa.

M2PP- ja M4PP-tekniikat vaikuttavat lupaavilta perinteiseen SRP-tekniikkaan verrattuna. M4PP-tekniikalla voidaan mitata aivan yhtä hyvin kuin SRP-tekniikalla, mutta anturipaine on pienempi, viistediffuusio ei ole yhtä voimakasta, mittausta ei tarvitse kalibraatiokäyriä, antureiden työstä esikäsittelyä, ja mittausta on myös nopea suorittaa ja helpompaa analysoida. Mutta M4PP-tekniikalla ei voida käytännössä katsoen mitata kuin pn-liitoksellisia rakenteita, sille ei ole olemassa vastaavaa korjauskerrointa kuin SRP-tekniikan tapauksessa, jonka merkitys korostuu pienemmissä rakenteissa, ja pienien anturien käyttöä ei ole tällä hetkellä kovin pitkä (sata-kaksisataa kontaktia), joka ei rohkaise vielä pienempien antureiden käyttöä nykyisessä muodossa. M2PP-tekniikka on erittäin lupaava pienen kontaktisäteen ansiosta, sitä voidaan käyttää kaikenlaisilla rakenteilla, yhtä aikaa M4PP-mittausten kanssa ja sen käyttöä on huomattavasti pidempi sekä mahdollisuus käyttää entistä pienempää anturia on jo olemassa. Viistediffuusioakin lienee lievempi M2PP-tekniikan tapauksessa SRP-tekniikkaan verrattuna johtuen pienemmästä kontaktipaineesta. Sen suurin ongelma on tällä hetkellä suuren mittauskohinan syyn selvittäminen.

Eri tekniikoiden erot, varsinkin herkkyydessä, olisivat luultavasti vielä huomattavampia ohuemmillä rakenteilla (alle 50 nm), joissa antureiden koko ja ominaisuudet korostuisivat entisestään – ja joita varten uusia tekniikoita juuri tarvitaan.

Viitteet

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2011, <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.html/>, käyty 30.03.2013
- [2] B. G. Yacobi, *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003
- [3] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3. painos, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006
- [4] Copenhagen Applied Research (Capres A/S), <http://www.capres.com/>
- [5] D. H. Petersen ym., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28** (2010) C1C27
- [6] T. Clarysse ym., *AIP Conf. Proc.*, **1496** (2012) 167
- [7] J. W. Orton, *Story of Semiconductors*, Oxford University Press, Oxford, 2004
- [8] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication*, 2. painos, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2010
- [9] D. R. Lide, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 91. painos, CRC Press, Boca Raton, 2010
- [10] M. Razeghi, *Fundamentals of Solid State Engineering*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, 2002
- [11] G. Impellizzeri ym., *Appl. Phys. Expr.*, **5** (2012) 021301
- [12] Y. Kamata, *Mater. Today*, **11** (2008) 30
- [13] H. D. Young ja R. A. Freedman, *Seas and Zemansky's University Physics: with Modern Physics*, 11th (kansainvälinen) painos, Pearson Addison-Wesley, San Francisco, 2004
- [14] T. Clarysse ym., *Mat. Sci. Eng. R.*, **47** (2004) 123
- [15] J. D. Plummer ym., *Proc. IEEE*, **83** (2001) 240
- [16] R. G. Mazur, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10** (1992) 397
- [17] S. M. Hu, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982) 1499
- [18] R. Ling ym., *AIP Conf. Proc.*, **1496** (2012) 175
- [19] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1873
- [20] R. G. Mazur ja D. H. Dickey, *J. Electrochem. Soc.*, **133** (1966) 255

- [21] P. A. Schumann ja E. E. Gardner, *J. Electrochem. Soc.*, **116** (1969) 87
- [22] R. D. Brooks ja H. G. Mattes, *Bell Syst. Tech. J.*, **50** (1971) 775
- [23] S. M. Sze ja K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3. painos, John Wiley & Sons, Hoboken, 2007
- [24] E. J. Hartford ym., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (2000) 401
- [25] S. T. Dunham ym., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12** (1994) 283
- [26] H. L. Berkowitz ja R. A. Lux, *J. Electrochem. Soc.*, **128** (1981) 1137
- [27] M. Pawlik, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10** (1992) 388
- [28] M. Italia, yksityinen sähköpostikeskustelu (2013)
- [29] T. Clarysse, Imec-ohjaaja, yksityinen sähköpostikeskustelu (2012-2013)
- [30] W. Thomson, *Proc. R. Soc. Lond.*, **11** (1860) 313
- [31] L. B. Valdes, *Proc. IRE*, **42** (1954) 420
- [32] F. M. Smits, *Bell Syst. Tech. J.*, **37** (1958) 711
- [33] L. J. van der Pauw, *Philips Res. Rep.*, **13** (1958) 1
- [34] L. J. van der Pauw, *Philips Tech. Rev.*, **20** (1958) 220
- [35] W. Aderhold, *Proc. Int. Conf. Ion Implantation Technology*, (2000) 199
- [36] T. Clarysse ym., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **912** (2006) 197
- [37] T. Clarysse ym., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **253** (2006) 136
- [38] J. Albers ja H. L. Berkowitz, *J. Electrochem. Soc.*, **132** (1985) 2453
- [39] M. P. Alberts ja J. F. Combs, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **ED-11** (1964) 148
- [40] C. L. Petersen ym., *14th IEE Int. Conf. Advanced Thermal Processing of Semiconductors*, (2006) 156
- [41] R. Rymaszewski, *J. Phys. E: J. Sci. Instrum.*, **2** (1969) 170
- [42] S. Thorsteinsson ym., *Rev. Sci. Instrum.*, **80** (2009) 053902
- [43] J. Albers ja H. L. Berkowitz, *J. Electrochem. Soc.*, **131** (1984) 392
- [44] T. Clarysse ym., *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, **4** (2001) 61
- [45] S. Fearn ja D. S. McPhail, *Appl. Surf. Sci.*, **252** (2005) 893
- [46] T. Clarysse ym., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24** (2006) 381

- [47] M. Kuruc ym., *J. Electr. Eng.*, **59** (2008) 302
- [48] A. Casel ja H. Jorke, *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 989
- [49] T. Clarysse ja W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12** (1994) 290
- [50] T. Clarysse ym., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26** (2008) 317
- [51] D. S. McPhail, *J. Mater. Sci.*, **41** (2006) 873
- [52] Solecon Laboratories, Piin ja germaniumin resistiivisyyksien ja varauksenkuljettajien pitoisuuksien laskin, <http://www.solecon.com/sra/rho2ccal.html>, käyty 03.05.2013
- [53] C. Wündisch ym., *Appl. Phys. Lett.*, **95** (2009) 252107
- [54] M. Konttinen, *Carrier Profiling with Microscopic Four-Point Probe*, Imec Internship Report, 29.02.2012
- [55] A. Dimoulas ja P. Tsipas, *Microelectron Eng.*, **86** (2009) 1577
- [56] P. P. Mani ym., *Appl. Phys. Lett.*, **101** (2012) 182105
- [57] Y. Zhou ym., *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 102103