

GaN-puolijohteen kontaktiresistanssi Ni/p-GaN
rajapinnassa

Pro Gradu
Turun yliopisto
Fysiikka
2022
Luk Vesa Nuutila
Tarkastajat:
FT Pekka Laukkanen
FM Mikko Miettinen

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Nuutila, Vesa GaN-puolijohteen kontaktiresistanssi Ni/p-GaN rajapinnassa

Pro Gradu, 31 s., 3 liites.

Fysiikka

Elokuu 2022

Puolijohteiden käyttö elektroniikassa on lisääntynyt jatkuvasti. Erityisesti 3. ja 5. pääryhmien alkuaineista valmistettujen yhdistepuolijohteiden käyttö valontuotannossa on kasvanut merkittävästi ledien ansiosta. Puolijohteiden suosio perustuu niiden energiatehokkuuteen, jota pyritään edelleen kehittämään. Yksi huomattava energiatehokkuutta vähentävä tekijä on lämpötila, joka aiheutuu materiaalien resistiivisyydestä. Resisttiivisyyden arvoon vaikuttaa muun muassa kidevirheet.

Galliumnitridi (GaN) on yhdistepuolijohde, jota käytetään erityisesti tehotransistoreissa ja ledeissä. Sen sähköisiä ominaisuuksia heikentää erityisesti p-tyypin galliumnitridi, johon on vaikea muodostaa kontaktia, joka olisi täysin ohminen. Tämä puolestaan kertoo heikosta varauksenkuljettajakonsentraatiosta näytteen pinnalla.

Tässä työssä tutkittiin kaliumhydroksidi (KOH) käsittelyn vaikutuksia p-tyypin galliumnitridin pinnan muutoksiin sekä sähköisiä ominaisuuksia nikkelikontaktin kanssa ja määritettiin kontaktiresistanssin arvo niiden välille. Lisäksi tutkittiin lämpökäsittelyn vaikutusta sähköisiin ominaisuuksiin.

Tulosten perusteella voidaan todeta KOH-käsittelyn poistavan oksidikerrosta sekä parantavan p-tyypin pirstystä galliumnitridin pinnalta. Lämpökäsittelyllä havaittiin olevan merkittävä rooli ohmisen kontaktin muodostumisessa nikkelin ja galliumnitridin välille.

Asiasanat: GaN kontaktiresistanssi p-tyyppinen GaN

Sisällys

Johdanto	1
1 Taustaa	2
2 Tutkimusmenetelmät	5
2.1 Kontaktin muodostus	5
2.2 Pintamittaukset	7
2.2.1 LEED	8
2.2.2 STM	11
2.2.3 XPS	12
2.3 Sähköiset mittaukset	13
3 Tulokset	15
3.1 LEED-mittaukset	18
3.2 STM-mittaukset	20
3.3 XPS-mittaukset	22
3.4 Resistiivisyystulokset	23
4 Yhteenveto	27

Johdanto

Galliumnitridin (GaN) käyttö ledeissä sekä transistoreissa on yleistynyt merkittävästi viime vuosina ja niitä kehitetään jatkuvasti kestävämmiksi ja energiatehokkaammiksi. Esimerkiksi ledien toiminta perustuu p- ja n-tyyppin puolijohteen väliseen liitokseen, joka emittoi valoa, kun niiden välille kytketään jännite tai liitoksen läpi johdetaan sähkövirtaa metallikontaktien kautta. [1]

Energiatehokkuuden ja kestävyuden kannalta merkittävä tekijä on lämpötila. Esimerkiksi ledeissä lämpeneminen aiheuttaa valoemission pienenemistä ja lyhentää käyttöikää. Lämpötilan kasvu komponentissa aiheutuu resistanssista ja vielä nykyäänkin tutkitaan materiaaleja, joilla voitaisiin pienentää resistanssia puolijohdelaitteissa. Tämän vuoksi puolijohdeiden pinnalle tehdään metallikontakti. Metallikontaktin ansiosta myös puolijohdekomponentissa syntyvä lämpö siirtyy tehokkaammin ympäristöön.

Metallikontaktin ja puolijohteen välisestä liitoksesta aiheutuu myös resistanssia, joka riippuu esimerkiksi käytetystä metallista ja puolijohdepinnan käsittelystä. Tätä resistanssia kutsutaan kontaktiresistanssiksi. Erityisesti p-tyyppin galliumnitridin ja metallin välillä on korkea kontaktiresistanssi. Tämän resistanssin pienentämisellä voitaisiin tulevaisuudessa tuottaa energiatehokkaampia ja kestävämpiä puolijohdekomponentteja.[2]

Tässä työssä määritetään kontaktiresistanssin arvo nikkelin (Ni) ja p-tyyppin galliumnitridin välille. Lisäksi tutkitaan kaliumhydroksidin vaikutusta p-tyyppin galliumnitridin pinnan ominaisuuksiin.

1 Taustaa

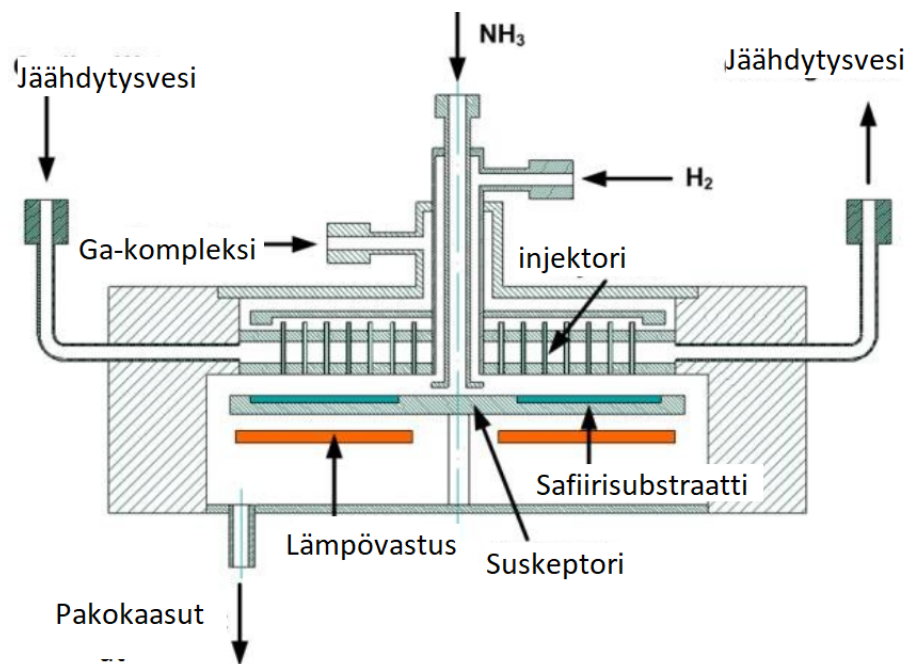
Galliumnitridin käyttö muun muassa valaistusmateriaalina johtuu sen laajasta ja suorasta energia-aukosta (band gap), minkä ansiosta sitä voidaan käyttää myös korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi galliumnitridillä on korkea elektronien liikkuvuus ja hyvä lämmönjohtokyky, jotka mahdollistavat energiatehokkaiden komponenttien valmistuksen korkeissakin lämpötiloissa. [3]

Galliumnitridi valmistetaan usein ohutkalvoksi kasvattamalla se epitaksiaalisesti kemiallisella kaasufaasipinnoituksella (Metalorganic vapour-phase epitaxy, MOCVD) safirisubstraatille. Epitaksiaalinen kasvu tapahtuu korkeassa lämpötilassa ($\sim 1000^\circ\text{C}$) olevassa reaktorissa, jonne johdetaan kantokaasua, eli typpi- tai vetykaasua, ammoniakkia ja galliumkompleksia. Kantokaasujen tehtävä on kuljettaa metallikompleksit substraatille. Paineen arvo reaktorissa vaihtelee välillä 50-1000 mbar riippuen muun muassa valmistettavasta materiaalista.

Reaktorissa kaasut ohjataan injektorin kautta suskeptorille. Injektori erottelee kaasut ennen aikaisten reaktioiden välttämiseksi ja suskeptori on pyörimisliikkeessä oleva kiekko, jonka päällä on safirisubstraatti. Suskeptorin pyöriminen parantaa näytteen tasalaatuisuutta.

Suskeptorin pintaa lämmitetään myös jatkuvasti, minkä seurauksena kaasut alkavat hajota lähestyessään substraattia. Juuri ennen substraatin pintaa, metallikompleksit ja ammoniakki (NH_3) hajoavat typeksi ja galliumiksi, jotka reagoivan keskenään ja muodostavat substraatin päälle ohuen galliumnitridikerroksen. Kaasufaasipinnoituksessa galliumnitridiin sitoutuu myös epäpuhtauksia, kuten hiiltä (C), vetyä (H) ja happea (O), jotka ovat usein peräisin kasvuympäristöstä tai lähdekaasuista. Sitoutuneiden epäpuhtauksien vuoksi p-tyyppin puolijohteen valmistaminen on hankalaa, koska se aiheuttaa epätasaisuutta varauksenkuljettajakonsentraatioissa tai varauksenkuljettajakonsentraatio jää tavoiteltua pienemmäksi.

Kaaviokuva galliumnitridin valmistuksesta on esitetty kuvassa 1. [3–5]



Kuva 1. Periaatekuva GaN valmistusprosessista. Kuvassa Ga-kompleksit ohjataan vetykaasun avulla ammoniakkin kanssa injektorin läpi susseptorille. Susseptorin korkeamman lämpötilan seurauksena kompleksit ja ammoniakki hajoavat juuri ennen safiirisubstraattia, jolloin Ga ja N voivat reagoida keskenään. [6]



Kuva 2. Periaatekuva Mg:n pirstämisen vaikutuksista. Kuvassa Mg synnyttää akseptoritilan, johon elektronit voi siirtyä valenssivyöltä. Johtovyö ja valenssivyö on piirretty aaltovektorin (k) funktiona ja energia-aukko on näiden vöiden pienin välimatka energia-asteikolla.

Puhdas galliumnitridi on huono johde ja käyttäytyy eristeen tavoin. Sähköiset ominaisuudet paranevat, kun siihen seostetaan sopivaa ainetta. P-tyypin puolijohteen valmistuksessa reaktoriin johdetaan lisäksi Mg-molekyylejä. Tätä kutsutaan pirstämiseksi (doping). Pirstämisessä käytetyn aineen (dopant) konsentraatio vaihtelee ja sen suuruudella voidaan vaikuttaa varauksenkuljettajakonsentraatioon. [7]

Pirstämisen seurauksena magnesium synnyttää energia-aukon alaosaan akseptori(acceptor)tilan. Akseptoritila on niin lähellä valenssivyötä (valence band), että elektronit voi siirtyä valenssivyötä akseptoririlaan. Tämän seurauksena valenssivyön varauksenkuljettajakonsentraatio kasvaa. Periaatekuva magnesiumin vaikutuksesta on esitetty kuvassa 2

Nämä varauksenkuljettajat alkavat liikkua p-tyypin galliumnitridin ja metallin välisen liitoksen yli, kun liitosta ryhdytään lämmittämään. Kun osa varauksenkuljettajista siirtyy valenssivyöltä johtovyölle (conduction band), osa varauksenkuljet-

tajista rekombinoituu takaisin valenssivyölle saavuttaen lopulta tasapainon reaktioiden osalta. Sekä puolijohteen että metallin varauksenkuljettajien irrottamiseen tarvitaan energiaa. Tätä energiaa kutsutaan irroitustyöksi (work function), joka tarkoittaa tyhjiötason ja Fermi-tason välistä energiaeroa. Irroitustöiden avulla voidaan määrittellä myös kontaktin tyyppi. Schottky-tyyppisessä kontaktissa (Schottky contact) edellytyksenä on, että metallissa olevien elektronien irroitustyö on pienempi kuin p-tyypin puolijohteessa olevien elektronien, jolloin elektronien diffuusio tapahtuu metallista puolijohteeseen. Kun diffuusio on asettunut tasapainoon, muodostuu rajapintaan diffusioeste, jolloin kokonaisvirta menee nolllaksi ja syntyy sisäinen sähkökenttä. Tätä kutsutaan Schottky-esteeksi (Schottky barrier) ja se aiheuttaa myös vyön taipumisen rajapinnalla.

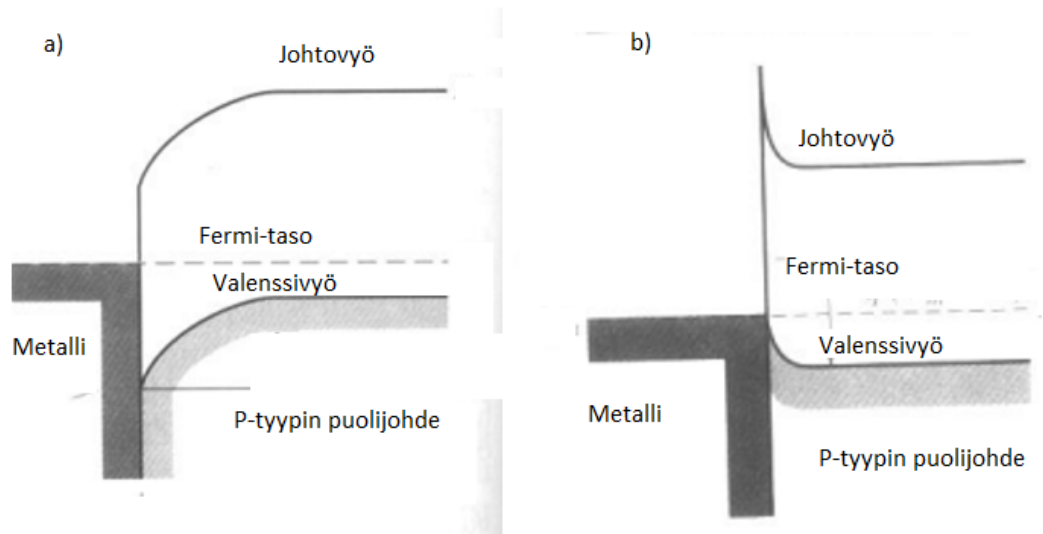
Ohmisessa kontaktissa (ohmic contact) puolestaan edellytykset ovat päinvastaiset, jolloin varauksenkuljettajat ei pysty pakenemaan yhtä helposti, vaan kerääntyvät rajapinnalle. Diffusioesteen ylittämiseksi elektroni tarvitsee pienemmän termisen energian ohmisessa kontaktissa. Periaatekuvat Schottky- ja ohmiselle kontaktille on esitetty kuvassa 3. [8]

2 Tutkimusmenetelmät

Tässä työssä tutkittiin p-tyypin GaN-kidettä tekemällä erilaisia pintamittauksia sekä sähköisiä mittauksia. Sähköisiä mittauksia varten valmistettiin metallikontakti näytteen pinnalle.

2.1 Kontaktin muodostus

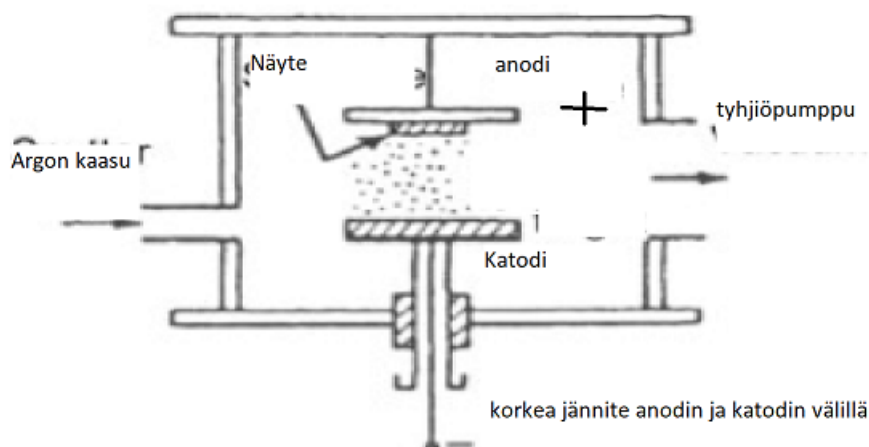
Metallikerros näytteen pinnalle valmistettiin sputteroimalla (sputtering). Sputteroinnissa tyhjiökammiossa olevaan näytteeseen pommitetaan haluttuja metalliatomeja. Metalliatomit irroitetaan metallilevystä plasmapurkauksesta peräisin olevien



Kuva 3. Periaatekuva Schottky-tyyppisen (a) ja ohmisen (b) kontaktin eroista p-tyyppin galliumin ja nikkelin välisestä liitoksesta. Kuvasta voidaan nähdä miten vyön taipuminen ylöspäin vaikuttaa Schottky esteen muodostumiseen. [8]

ionien ja neutronien avulla. Plasmapurkaus syntyy, kun argonkaasua syötetään tyhjiökammioon. Lisäksi kammiossa olevien anodin ja katodin välille kytketään riittävän suuri jännite, jolloin tapahtuu läpilyönti. Plasmapurkauksessa positiivisesti ionisoituneet argon-ionit törmäävät kovalla vauhdilla katodiin. Pinnoittava metalli toimii katodina, josta törmäyksien vuoksi irtoaa atomeja. Irronneet atomit sinkoutuvat kohti anodia, jonka päällä on sputteroitava näyte. Tämän seurauksena atomit päätyvät anodin sijasta sputteroitavan näytteen pinnalle ja ne muodostavat ohuen kerroksen. Periaatekuva sputteroinnista on esitetty kuvassa 4. Tässä työssä katodina käytettiin nikkeliä. [10] [11]

Metalloinnin jälkeen kontaktikuviointi tehtiin optisen litografian (photolithography) avulla nikkeli-kerroksen päälle. Optisessa litografiassa puhdistetun näytteen päälle levitetään tasaisesti fotoresisti. Fotoresisti on aine, jonka kemialliset ominaisuudet muuttuvat tietynsäteilyn seurauksena. Valoresisti voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Positiivisesta valoresististä tulee helposti liukeneva ja negatiivisesta niukkaliukoinen säteilytyksen jälkeen. Kun valoresisti on levitetty ta-



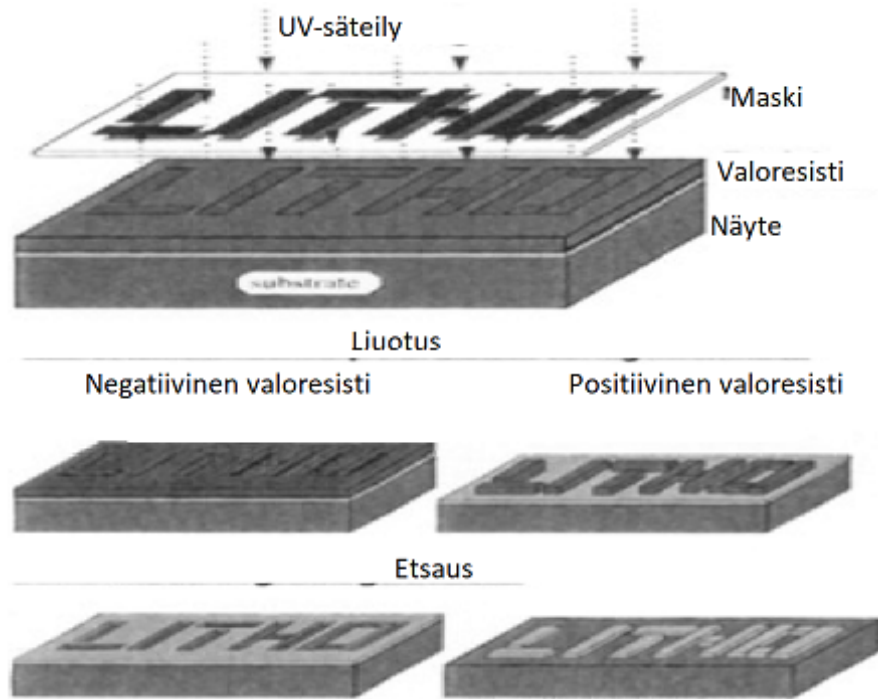
Kuva 4. Periaatekuva sputteroinista. Kuvassa argonkaasu johdetaan tyhjiökammioon, jossa jännite on suurempi kuin läpilyöntijännite. Sen seurauksena syntyy plasmapurkaus, jolloin ionisoituneet argon-ionit törmäävät haluttuun metallikatodiin ja irrottavat sieltä atomeja. Irroneet atomit törmäävät näytteeseen ja muodostavat sen pinnalle metallikerroksen. [9]

saisesti näytteelle, sitä kuumennetaan, jotta saadaan poistettua liuotin valoresististä.

Ennen näytteen säteilytystä, siihen asetetaan maski, jossa on haluttu kuviointi. Maskin kuvioinnin alla oleva valoresisti ei altistu säteilylle, jolloin haluttu kuviointi muodostuu myös näytteen pinnalle. Lopullinen kuviointi näytteeseen saadaan, kun siitä liuotetaan pois valoresististä riippuen joko maskin alla tai maskin ympärillä oleva valoresisti. Liuottimena toimii yleensä emäs. Jäljelle jäänyt fotoresisti muodostaa etsausta suojaavan kerroksen kuvioinnin päälle, jolloin muodostuu lopullinen kontaktikuviointi. Periaatekuva optisesta litografiasta on esitetty kuvassa 5. Tässä työssä säteilytykseen käytettiin UV-säteilyä ja positiivista valoresististä. [12–14]

2.2 Pintamittaukset

Pintamittaukset suoritettiin käyttämällä matalaenergistä elektronidiffraktiota (low-energy electron diffraction, LEED), tunnelointimikroskooppia (scanning tunneling



Kuva 5. Periaatekuva optisesta litografiasta UV-säteilyllä. Kuvassa on esitetty prosessi vaiheittain sekä positiivisella että negatiivisella valoresistillä. [14]

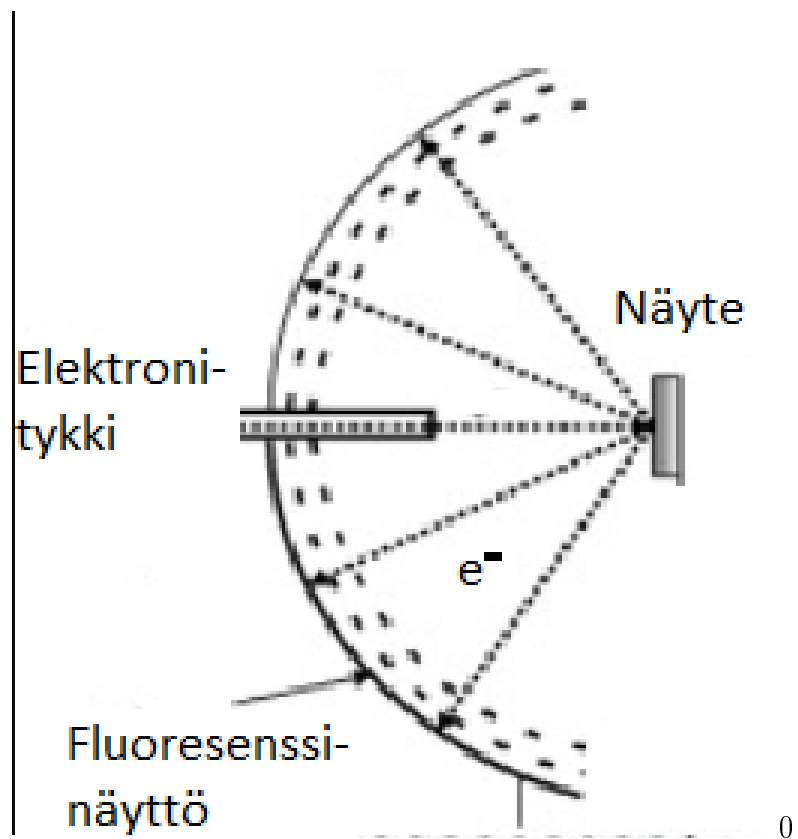
microscope, STM) ja röntgenvirteistä fotoelektronispektrometriaa (x-ray photoelectron spectroscopy, XPS). Mittaukset tehtiin ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn.

Pintatutkimuksen avulla pyrittiin selvittämään KOH-käsittelystä aiheutuneita muutoksia näytteen pinnalla. Tämän vuoksi myös näytteen ilma-altistus pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä KOH-käsittelyn jälkeen, jotta KOH-käsittelyn mahdolliset vaikutukset näkyisivät selkeämmin erityisesti hiilen ja hapen osalta.

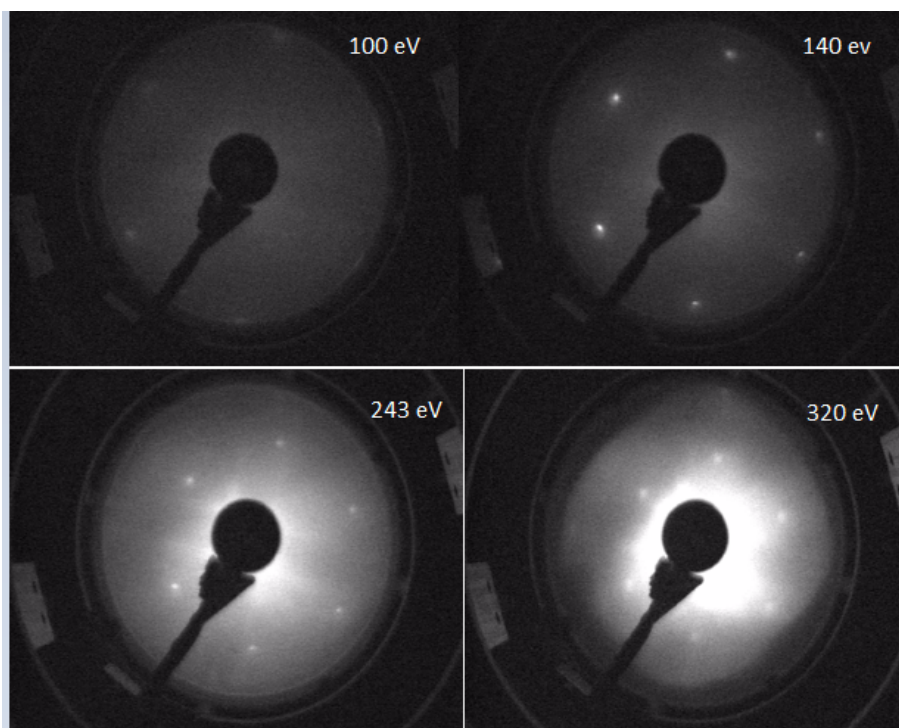
2.2.1 LEED

LEED-mittaukset perustuvat kohtisuorasti näytteeseen tulevaan elektronisuihkuun tyhjiöolosuhteissa. Osuessaan näytteen pinnalle osa elektroneista siroavat näytteen pinnalta ja diffraktoituvat. Diffraktiokuvio voidaan havaita fluoresenssinäytön avulla. LEED-mittauksen toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 6. [15]

Havaittu diffraktiokuvio kertoo näytteen käänteishilan reaaliavaruudessa, jon-

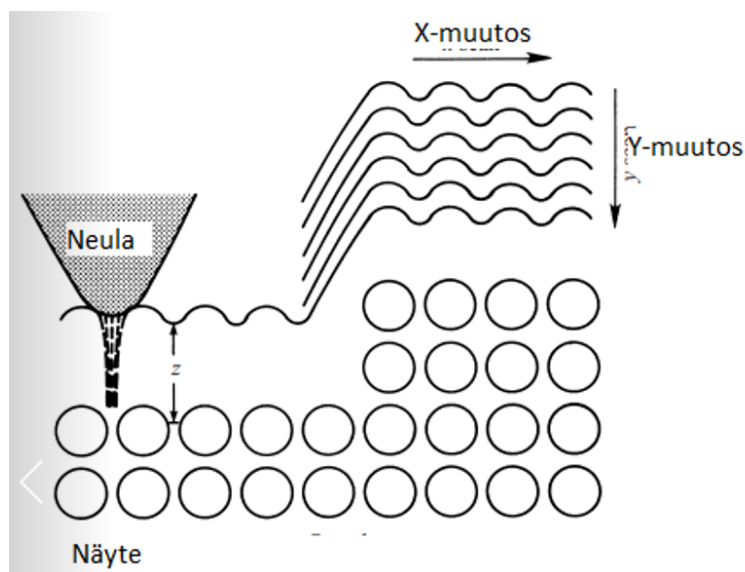


Kuva 6. Periaatekuva LEED-mittauksesta. Kuvassa elektroneja pommitetaan kohtisuorasti näytteeseen, jolloin osa elektroneista siroaa näytteen pinnalta. Sironneet elektronit diffraktoituvat, joka havaitaan fluoresenssinäytön avulla. [16]



Kuva 7. GaN näytteen diffraktiokuvioita LEED-mittauksen avulla eri elektronin energioita käyttämällä.

ka avulla voidaan määrittää näytteen todellinen hila. Muodostunut diffraktiokuvio riippuu näytteen kiderakenteesta. Diffraktiokuvion muodostumiseen vaikuttaa myös näytteen puhtaus, esimerkiksi paljon epäpuhtauksia sisältävässä näytteessä diffraktiokuvioita ei välttämättä havaita ollenkaan, koska pintakerros on amorfinen. Lisäksi kuvioon vaikuttaa elektronin energia. Korkeaenergisemmässä elektronisuihkussa aallonpituus pienenee, jolloin myös havaittu diffraktiokuvio pienenee ja elektronien matka ilman energiamenetyksiä suurenee. Tämän vuoksi diffraktiokuvio syntyy syvemmällä näytteessä, mutta korkeintaan nanometrin syvyydessä. Diffraktiokuvion muutoksia on havainnollistettu kuvassa 7, jossa 1x1 diffraktiokuvio on asetettu suuruusjärjestykseen siten, että suurin elektronin energia on oikeassa alalaidassa (320 eV) ja pienin vasemmassa yläalaidassa (100 eV). Muut käytetyt elektronin energiat olivat 140 eV ja 243 eV.



Kuva 8. Periaatekuva STM-mittauksesta. Kuvassa neulan ja näytteen pinnan väliin jäävä tyhjiö, muodostaa potentiaalivallin, jonka läpi tunneloitumisilmiö tapahtuu.[17]

2.2.2 STM

STM-mittaukset perustuvat tunnelointivirtoihin tyhjiöolosuhteissa. Tunnelointivirrat voi syntyä, kun ohut neulankärki tuodaan riittävän lähelle näytteen pintaa ja neulaan kytketään esijännite suhteessa näytteeseen. Tätä kutsutaan bias-jännitteeksi. Neulan kärjen ja näytteen välinen etäisyys on oltava alle 1 nm. [17] Tunnelointivirran arvoon vaikuttaa myös neulan ja näytteen välinen etäisyys, joten STM-mittauksen avulla voidaan havaita muutokset näytteen pinnalla, kun tunnelointivirta pidetään vakiona. Pinnan muodosta sekä sen muutoksista pysty- ja vaakasuunnassa voidaan arvioida esimerkiksi näytteen puhtautta [15]. Periaatekuva tunnelointimikroskoopista on esitetty kuvassa 8. Tunnelointivirtojen avulla voidaan tutkia myös näytteen energiatilojen tiheyttä, koska ne vaikuttavat tunnelointivirran arvoon. Tämä onnistuu piirtämällä kuvaaja differentiaalisen konduktanssin bias-jännitteen funktiona.

Lisäksi Fermi-tason yläpuolelta on mahdollista saada tietoa tunnelointispektroskopian (STS) avulla tyhjistä elektronitiloista. Puolijohteiden tapauksessa lähellä Fermi-tasoa STS-mittauksella voidaan määrittää näytteelle myös energia-aukon

suuruus, kun tunnetaan väli, jolloin differentiaalinen konduktanssi on nolla. [15]

2.2.3 XPS

XPS-mittauksien avulla voidaan tutkia pinnan materiaalikoostumusta röntgensäteilyn avulla. Synnytetty röntgensäteily ohjataan lähes tyhjiössä olevaan näytteeseen, jolloin näytteeseen osuvat fotonit irrottavat näytteestä elektroneja. Elektroni irtoaa näytteestä, kun fotonin energia on suurempi kuin elektronin sidosenergia. Elektronin sidosenergia voidaan määrittää kaavan 1 avulla

$$E_s = E_f - E_k - E_w, \quad (1)$$

missä E_s on elektronin sidosenergia, E_f fotonin energia, E_k irronneen elektronin liike-energia ja E_w spektrometrin työfunktio. Kun taajuus tunnetaan, fotonin energia voidaan laskea Planckin lain avulla kaavalla 3,

$$E_f = hv, \quad (2)$$

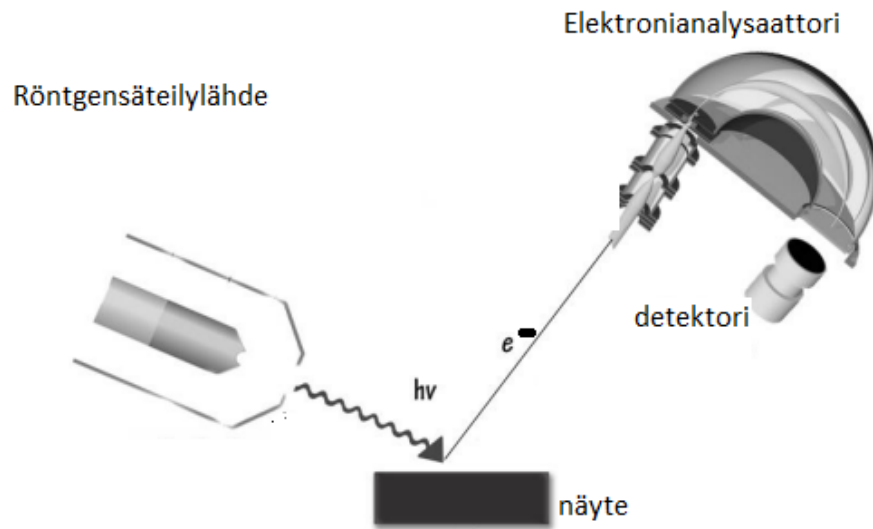
missä h on Planckin vakio ja v taajuus.

Elektronin sidosenergioiden perusteella voidaan päätellä, mistä alkuaineesta elektronit ovat peräisin. XPS-mittauksen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 9. [15][18]

Sidosenergioiden intensiteettiipiikit voivat siirtyä yhdisteessä, koska sidosenergia voi kasvaa tai pienentyä uusien yhdisteiden muodostumisen seurauksena. Lisäksi sidosenergian intensiteettiipiikin korkeuden ja niiden lukumäärän sekä alkuaineen herkkyystekijän avulla voidaan arvioida kyseisen alkuaineen määrää näytteessä. [20][15]

XPS-mittauksissa röntgensäteily tuotetaan yleensä röntgenputken avulla, jossa on esimerkiksi magnesium- tai alumiinianodi [20]. Tässä työssä röntgensäteily on synnytetty alumiinianodin kanssa. [15][18]

Mittaustuloksissa tarkkailtiin erityisesti galliumin 3d, typen 1s, hapen 1s, hiilen 1s ja magnesiumin 1s fotoelektronipiikkejä sekä niiden muutoksia. Lisäksi tutkittiin

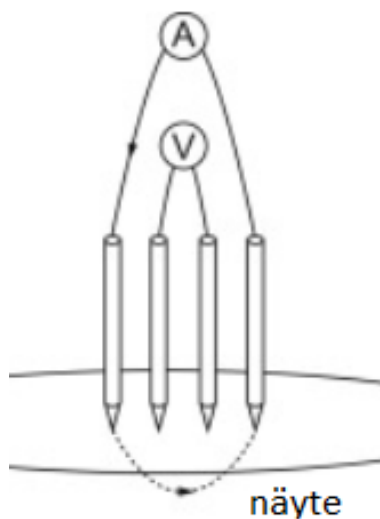


Kuva 9. Periaatekuva XPS-mittauksesta. Kun fotonin energia on riittävän suuri, se irroittaa elektronin näytteen pinnalta. Irronnut elektroni saapuu analysaattorin kautta detektorille, jonka avulla voidaan määrittää elektronin liike-energia ja siitä edelleen elektronin sidosenergia. Röntgensäteilyn fotonin energia voidaan puolestaan laskea Planckin lain avulla. [19]

kaliumin fotoelektronipiikkejä näytteessä KOH-käsittelyn jälkeen. Mittaukset tehtiin kahdesta mittauspisteestä ennen KOH-käsittelyä ja kolmesta mittapisteestä KOH-käsittelyn jälkeen.

2.3 Sähköiset mittaukset

Nikkelin ja GaN välillä oleva kontaktiresistanssi voidaan määrittää kahden metallikontaktien välisten kokonaisresistanssien avulla. Resistanssi voidaan määrittää nelipistemittauksen avulla (four-point probe), jossa yhteensä neljä eri anturia. Jokainen anturi mittaa yhtä suuretta. Jännitettä mitataan kahden anturin avulla ja muut anturit mittaavat näytteestä lähtevä virtaa sekä näytteeseen tuleva virtaa. Tässä työssä näytteessä oleviin vastakkaisiin kontakteihin syötetään neulojen avulla jännitettä tietyillä arvoilla. Syötetty jännitte synnyttää näytteeseen myös sähkövirran, jonka suuruutta mitataan. Mittauksen avulla määritetään jännitehäviö, jonka avul-



Kuva 10. Periaatekuva nelipistemittauksesta, jonka avulla voidaan laskea resistanssi näytteelle [21]

la saadaan lopulta Ohmin lain perusteella laskettua näytteen kokonaisresistanssi, kun virran arvo tunnetaan. Periaatekuva nelipistemittausjärjestelystä on esitetty kuvassa 10

Metallin ja puolijohteen liitoksen kokonaisresistanssi koostuu puolijohteen resistanssista, kahdesta kontaktiresistanssista sekä kahdesta kontaktimetallin resistanssista. Kontaktimetallin resistanssin arvo on hyvin pieni suhteessa muihin resistanssin arvoihin, joten se voidaan jättää huomioimatta.[8] Kokonaisresistanssin arvo saadaan siten määritettyä allaolevasta kaavasta 3

$$R_{kok} = R_{pj} + 2R_k, \quad (3)$$

missä R_{kok} on kokonaisresistanssi, R_{pj} puolijohteen resistanssi ja R_k kontaktiresistanssi. Puolijohteen resistanssi voidaan puolestaan ilmaista kaavalla 4

$$R_{pj} = R_s \frac{L}{W}, \quad (4)$$

missä R_s on puolijohteen pinnasta aiheutuva resistanssi, jonka arvo on vakio koko näytteen pinnalla, W on pinnan leveys ja L pinnan pituus. Kun yhdistetään

ylläolevat kaavat 3 ja 4 Saadaan kokonaisresistanssi muotoon

$$R_{kok} = L \frac{R_s}{W} + 2R_k. \quad (5)$$

Toisaalta kokonaisresistanssi voidaan määrittää myös graafisesti Ohmin lain avulla, kun metallikontaktissa tapahtuva jännitehäviö ja virta tunnetaan.

Kaavaan 5 voidaan myös soveltaa suoran yhtälöä, jonka kulmakerroin on $\frac{R_s}{W}$. Kontaktiresistanssi voidaan siis määrittää kaavan 5 avulla tekemällä kontakteja eri etäisyyksillä. Saaduista arvoista tehdään lineaarinen sovitus, josta voidaan määrittää kontaktiresistanssi lineaarisen interpoloinnin avulla.[7, 8]

Työssä laskettiin myös kontaktiresistiivisyyden arvo, joka ilmoitetaan usein muissa tutkimuksissa, jolloin tuloksien vertailu on helpompaa. Kontaktiresistiivisyyden ρ arvo voidaan laskea kaavan 6 avulla

$$\rho = R_k W L_T, \quad (6)$$

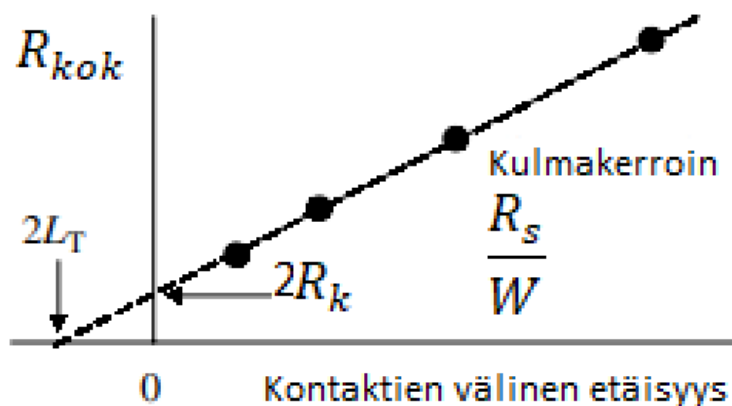
jossa L_T on kontaktin tehollinen pituus (transfer length). Tehollinen pituus voidaan määrittää kaavasta 5 muodostetusta suoran yhtälöstä, jossa L_T on x-akselin ja suoran leikkauspiste. Esimerkkisovitus ja sen avulla määritetyt suureet on esitetty kuvassa 11. Tehollinen pituus voidaan siis määrittää kontaktiresistanssin avulla, kun tiedetään että

$$R_k = \frac{R_s L_T}{W}. \quad (7)$$

Kaavasta 5 havaitaan että $\frac{R_s}{W}$ on sama kuin sovitetun suoran yhtälön kulmakerroin, jolloin L_T voidaan laskea jakamalla kontaktiresistanssin arvo kulmakertoimen arvolla.

3 Tulokset

Mittaukset suoritettiin p-tyyppin GaN-näyttteellä, jonka 20 nm paksu pinta oli piritetty voimakkaasti (heavily doped) magnesiumumilla. pintakerroksen alapuolella (layer)



Kuva 11. Kaavan 5 avulla sovitettu suora ja sen avulla graafisesti määritetyt suureet. [7]

oli noin $1,05 \mu\text{m}$ paksu p-GaN kerros ja tämän jälkeen ennen substraattia noin $2,3 \mu\text{m}$ paksu GaN puskurikerros (buffer). p-GaN kerroksen varauksenkuljettajakonsentraatio oli noin $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ja substraattimateriaalina oli käytetty safiiria.

Lisäksi näytteen pinta oli käsitelty kaliumhydroksidiliuoksella (KOH). Kaliumhydroksidin konsentraatio oli 4 M. Käsittely tehtiin upottamalla näyte minuutin ajaksi $60 \text{ }^\circ\text{C}$ KOH-liuokseen. KOH-käsittelyn jälkeen näytettä pidettiin tislatussa vedessä minuutin ajan ja lopuksi kuivattiin typpikaasulla. Lisäksi kontaktiresistanssimittaukset suoritettiin uudelleen, kun näytettä oli kuumennettu viiden minuutin ajan keraamisella vastuksella $31,68 \text{ W}$ teholla ultrasuurtyhjiössä (ultra-high vacuum), $500 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Tavoitelämpötilaa ei saavutettu välittömästi, vaan lämpötila näytteessä nousi hitaasti. Taustapaine lämmityksen aikana oli suuruusluokkaa 10^{-8} mbar .

Pintatutkimuksissa näytettä ei saatu välittömästi tyhjiöolosuhteisiin KOH-käsittelyn jälkeen, mikä mahdollisti uuden oksidin muodostumisen. STM- ja LEED-mittaukset toteutettiin samassa tyhjiökammiolaitteistossa ja XPS-mittauksessa käytettiin itsenäistä laitetta. STM- ja LEED-mittauksissa näyte oli ilmassa 13 minuuttia ennen tyhjiöpumppausta ja XPS-mittauksissa 5 minuuttia ennen tyhjiöpumppausta.

Taulukko I. Mittauksesta saadut kontaktiresistanssin ja kontaktiresistiivisyyden arvot kummaltakin mittausriviltä ennen lämmittämistä.

mittausrivi	jännitehäviöalue mV	kontaktiresistanssi Ω	kontaktiresistiivisyys Ωcm^2
b	-80-80	670000	484,4244604
b	-200-200	580000	420,5
c	-80-80	119500	20,84708029
c	-200-200	41150	3,364216887

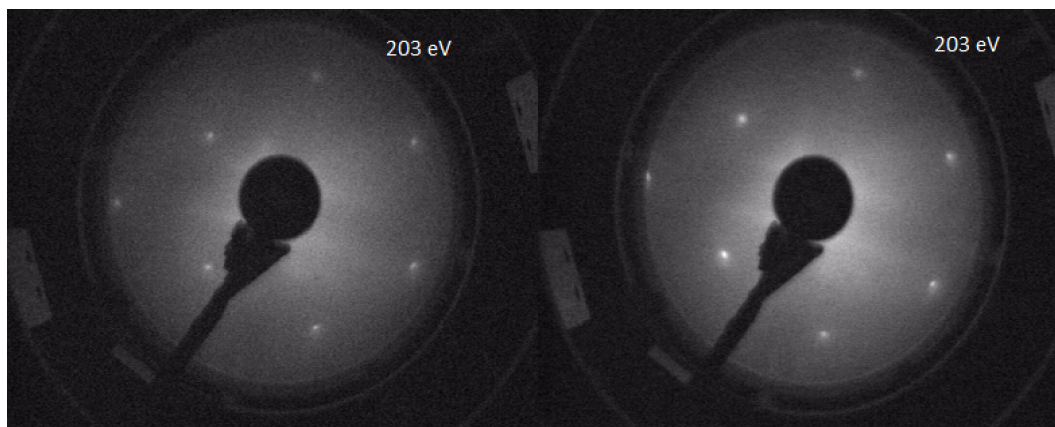
Taulukko II. Mittauksesta saadut kontaktiresistanssin ja kontaktiresistiivisyyden arvot kummaltakin mittausriviltä lämmittämisen jälkeen. Lisäksi kontaktiresistiivisyyksien arvoista laskettu keskiarvo

mittausrivi	jännitehäviöalue mV	kontaktiresistanssi Ω	kontaktiresistiivisyys Ωcm^2
b	-200-200	8550	6,498
c	-200-200	10850	10,46422222
Keskiarvo			8,4811111

Mittauspaine oli STM- ja LEED-mittauksissa suuruusluokkaa 10^{-9} mbar ja XPS-mittauksissa suuruusluokkaa 10^{-7} mbar. Erot mittauspaineista aiheutui käytettyä tyhjiöpumppauskalustosta. Ennen sähköisiä mittauksia toteutettua sputterointia näytteen ilma-altistus oli puolestaan 20 minuuttia KOH-käsittelyn jälkeen. Paine sputteroinnin aikana oli suuruusluokkaa 10^{-5} mbar.

Tässä työssä saadut kontaktiresistanssin sekä kontaktiresistiivisyyden arvot ennen lämmitystä ja lämmityksen jälkeen on esitetty taulukossa I ja taulukossa II. Leen ym. tutkimuksen mukaan GaN näytteen pinnalle tehty KOH-käsittely poistaa GaN kiteen pinnalta siihen muodostunutta oksidia. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, ettei KOH reagoi GaN kanssa.[22]

Myös kontaktiresistanssin arvo pieneni KOH-käsittelyn jälkeen [22]. Lisäksi Mori



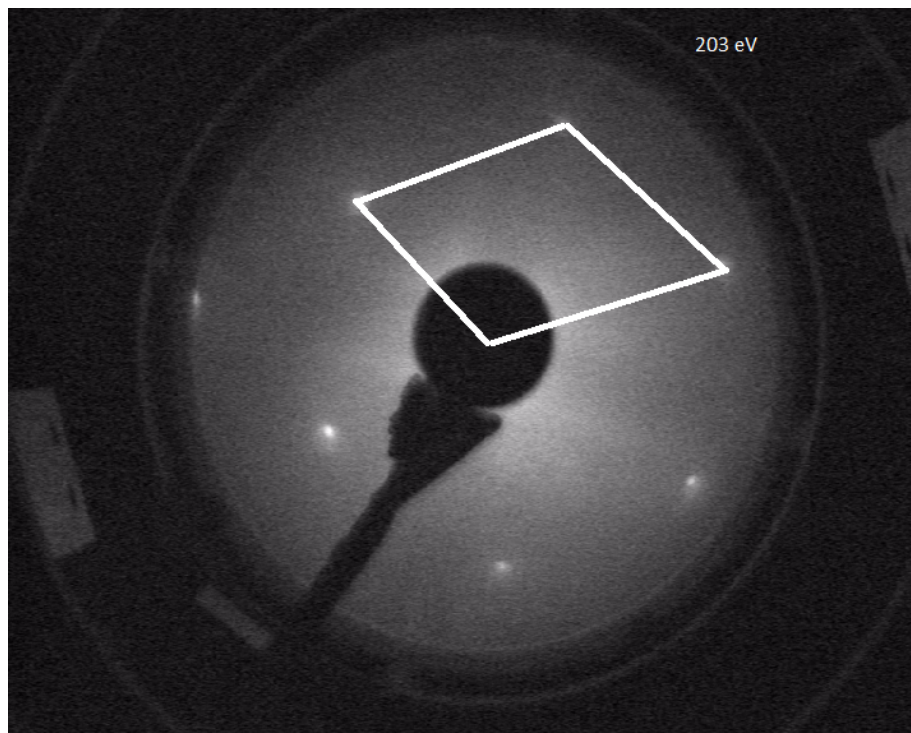
Kuva 12. GaN-näytteen diffraktiokuvioita ennen KOH-käsittelyä (vasen puoli) ja KOH-käsittelyn jälkeen (oikea puoli).

ym. tutkimuksessa GaN/Ni kontaktiresistiivisyyden arvoksi saatiin $0,015 \Omega\text{cm}^2$ [2]. Lisäksi Qiaon ym. tutkimuksessa jälkilämmityksen on havaittu parantavan ohmisen kontaktin muodostumista [23].

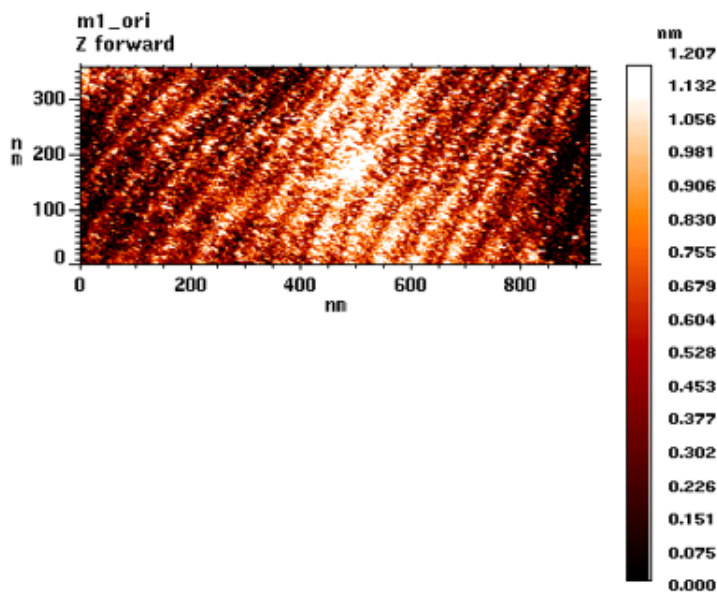
3.1 LEED-mittaukset

LEED-mittauksissa havittiin pieniä muutoksia diffraktiokuvion terävyydessä KOH-käsittelyn jälkeen. LEED-mittaukset ennen ja jälkeen KOH-käsittelyä on esitetty kuvassa 12. Mittauksissa on käytetty elektronin energiaa 203 eV. Mittausten perusteella saatu diffraktiokuvio on selkeämpi ja kirkkaampi KOH-käsittelyn jälkeen. Diffraktiokuvio erottuu kuitenkin selkeästi molemmilla mittauskerroilla, joten näytteen pinnalla ei esiinny merkittävästi epäpuhtauksia ennen KOH-käsittelyä.

LEED-mittausten avulla saadun käänteishilakuvion avulla pystyttiin selvittämään myös GaN-kiteen kiderakenne. Mittauksista saatu käänteishilakuvio on esitetty kuvassa 13, jonka perusteella GaN-kiteellä on wurtsiitti kiderakenne.



Kuva 13. Hahmoteltu valkoisella pienin mahdollinen suunnikas käänteishilan pisteiden avulla, jolla voidaan rakentaa heksagonaalinen pisteistö, kun oletetaan että yksi käänteishilan piste sijaitsee elektronitykin alla.



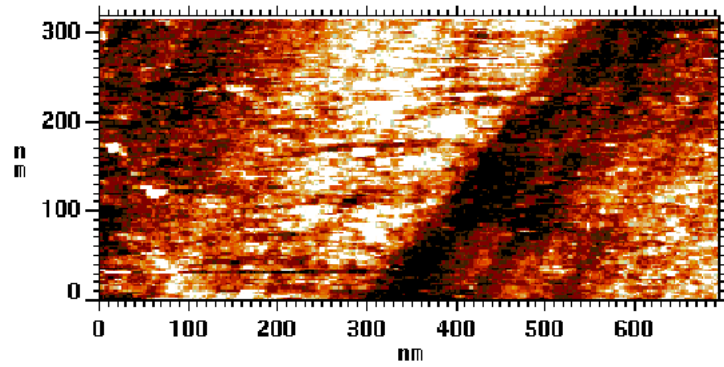
Kuva 14. STM-kuva ennen KOH-käsittelyä. Kuvassa havaitaan melko selkästi terassikohdat, vaikka näyte on ollut pitkään ilman kanssa kontaktissa, joten sen pinnalle on muodostunut oksidikerros.

3.2 STM-mittaukset

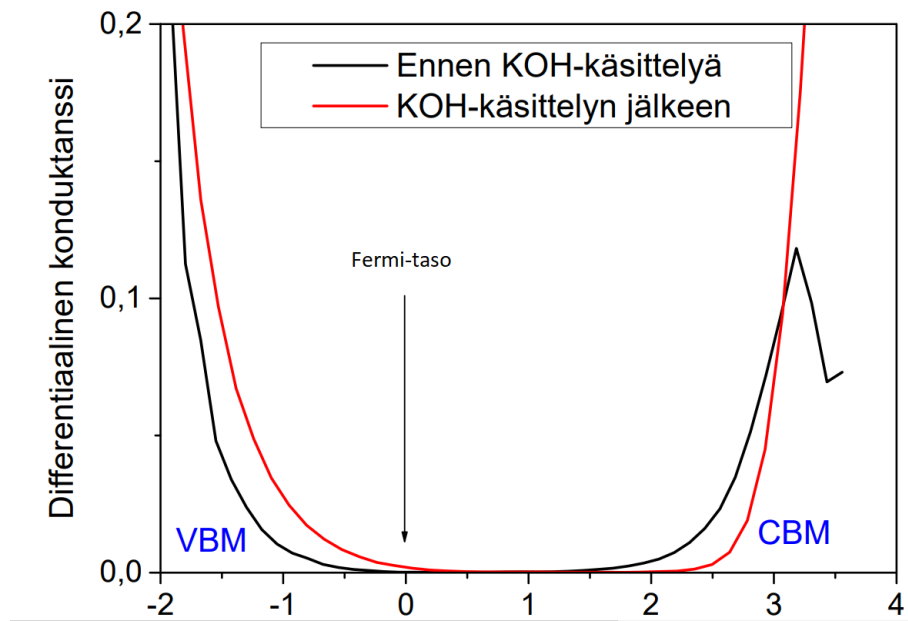
STM-mittauksissa näytteen pinta oli tasainen molemmilla mittauskerroilla ja niissä näkyi selkeät kaksiulotteiset terassit. Mittaustulokset ennen KOH-käsittelyä on esitetty kuvassa 14 ja KOH-käsittelyn jälkeen kuvassa 15.

STS-mittauksissa puolestaan havaittiin pieniä muutoksia Fermi-tason paikassa suhteessa valenssivyön maksimiin (VBM), kun sitä tutkittiin ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn. Energia-aukot ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn on esitetty kuvassa 16.

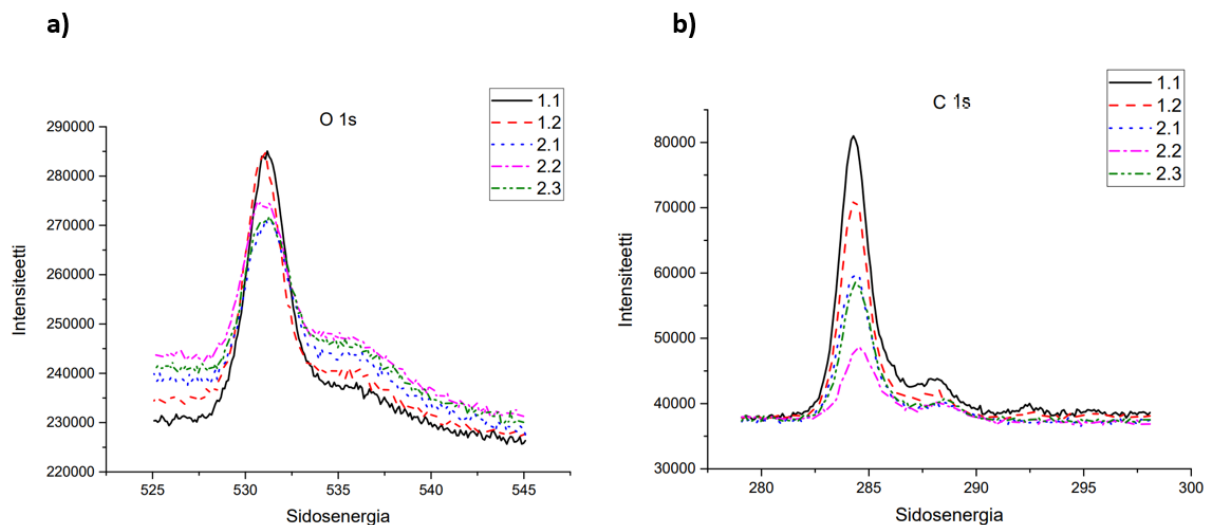
Kuvasta voidaan havaita, että energia-aukossa tapahtuu pieniä muutoksia. KOH-käsittelyn jälkeen alue, jossa konduktanssi on nolla, kasvaa. Silloin energia-aukko arvo kasvaa noin 0,25 eV. GaN energia-aukko on noin 3,4 eV. Pintakerroksen energia-aukko on yleensä pienempi bulk-kiteeseen verrattuna, joten saatu mittaustulos on melko hyvä KOH-käsittelyn jälkeen [24]. Mittauksissa KOH-käsittelyn jälkeen havai-



Kuva 15. STM-kuva KOH-käsittelyn jälkeen.



Kuva 16. STS-mittauksen avulla energia-aukot GaN näytteelle. Punainen käyrä on jälkeen ja musta käyrä ennen KOH-käsittelyä.



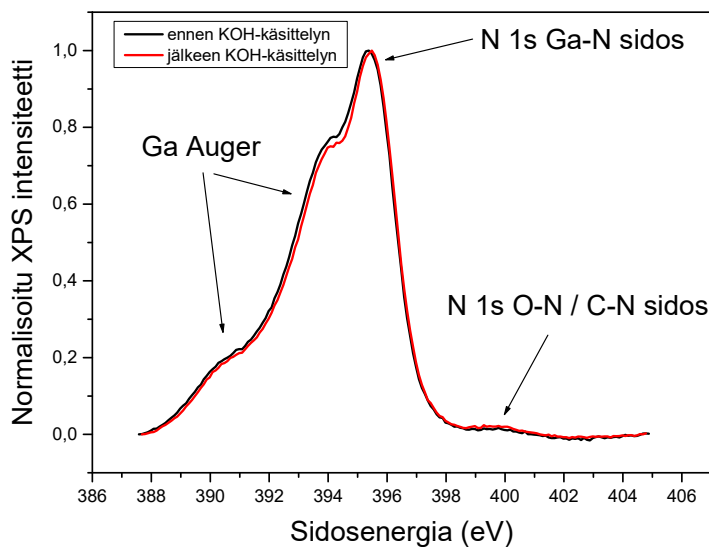
Kuva 17. Hapen (a.) ja hiilen (b.) XPS-spektrit ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn. 1.n kuvaajat ovat ennen KOH-käsittelyä ja 2.n kuvaajat käsittelyn jälkeen.

tun Fermi-tason siirtymisen kohti valessivyyön maksimia voidaan todeta, että kiteen pintakerroksessa oleva piristys paranee KOH-käsittelyn jälkeen.

3.3 XPS-mittaukset

XPS-mittauksissa hiilen ja hapen 1s intensiteetti-peakit pienenevät selkeästi KOH-käsittelyn jälkeen jokaisella mittauspisteellä. Saadut hiilen ja hapen kuvaajat ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn on esitetty kuvassa 17.

Typen 1s kuvaajassa havaittiin vain pieniä muutoksia ja Ga 3d kuvaajassa ei tapahtunut ollenkaan muutoksia käsittelyn jälkeen. Mitattu typen 1s kuvaaja ja kirjallisuudessa esitetty kuvaaja poikkesivat toisistaan, koska typen 1s piikki ei ole samanmuotoinen mittaustuloksen kanssa, vaan se sisältää ylimääräisiä piikkejä [20]. Tarkempi piikkien erittely typen 1s normalisoidusta XPS-kuvaajasta on esitetty kuvassa 18. Galliumilla havaittiin olevan myös Auger-siirtymiä hyvin lähellä typen sidosenergioita, jolloin piikit menevät hieman päällekkäin [20]. Havaittu magnesiumin 1s kuvaaja oli melko leveä molemmilla mittauserroilla, mutta sen muoto muuttui

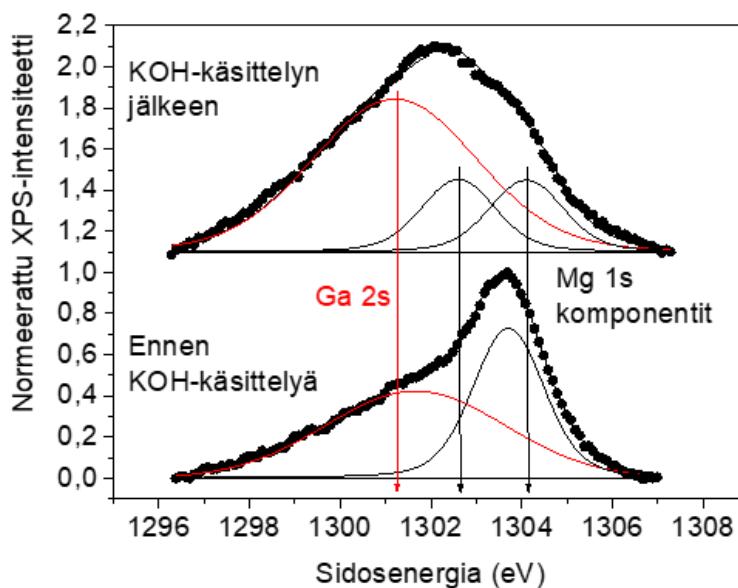


Kuva 18. Tarkempi esitys typen 1s XPS-kuvaajalle

KOH-käsittelyn jälkeen. Mäkelän ym. tutkimuksen mukaan magnesiumin on havaittu kuitenkin muodostavan erilaisia yhdisteitä, kun sitä on seostettu [25]. Magnesiumin lisäksi kuvaaja sisältää myös Ga 2s komponentin, joka tekee kuvaajasta entistä leveämmän [26]. Lisäksi Bermudez ym. havaitsi tutkimuksessaan magnesiumin oksidikerroksen pienentyvän KOH-käsittelyn jälkeen [26]. Tämä on myös todennäköisin syy magnesiumin 1s-kuvaajan muutokseen tässä tutkimuksessa ja tulos olisi sopusoinnussa hapen 1s intensiteetin pienenemisen kanssa. Saadut magnesiumin 1s kuvaajat ja niihin tehdyt sovitukset on esitetty kuvassa 19. Kuvassa magnesiumoksidista aiheutuva komponentti näkyy todennäköisesti noin 1304 eV kohdalla.

3.4 Resistiivisyystulokset

Sähköisiä mittauksia varten valmistettiin nikkelikontakti GaN-näytteen pinnalle sputtertoimalla 100 μm paksu nikkeli-kerros. Kontaktikuvioinnissa näyte huuhdeltiin asetonilla sekä isopropanolilla ja kuivattiin lopuksi typpikaasulla. Positiivinen valoresistiti levitettiin spinnerillä, jonka jälkeen sitä kuumennettiin 115 $^{\circ}\text{C}$ 30 sekunnin ajan.



Kuva 19. Sovitettu XPS-spektri magnesium 1s-kuvaajalle ennen ja jälkeen KOH-käsittelyn. Punaisella käyrällä on kuvattu Ga 2s komponenttia ja Mg 1s komponenttia mustalla käyrällä.

Tämän jälkeen näytettä säteilytettiin UV-valossa 80 sekuntia. Valotuksessa käyetty maski teki 4 suorakulmion muotoista kontaktiriviä. Kontaktirivissä yhden kontaktikuvion leveys oli 600 μm . Kontaktirivit nimettiin aakkosjärjestyksessä siten, että ylin rivi nimettiin d-riviksi ja alin rivi a-riviksi. Kontaktien väliset etäisyydet kasvoivat 100 μm välein kun siirryttiin kontaktirivissä vasemmalta oikealle. Pienin mahdollinen kontaktien välinen etäisyys oli 300 μm . Säteilytetty valoresisti liuotettiin natriumhydroksidissä (NaOH) 35 sekuntia.

Optisen litografian jälkeen näyte etsattiin 12 prosenttisella vetykloridiliuoksella (HCl) yhteensä 8 minuuttia. Lisäksi näytettä huuhdeltiin tislattulla vedellä minuutin ajan etsausjaksojen välissä. Mittaukset suoritettiin lyhimmillä kontaktien välisillä etäisyyksillä, jolloin kokonaisresistanssin arvot ovat luotettavampia [7]. Sähköiset mittaukset toistettiin lämpökäsittelyn jälkeen.

Mittaukset suoritettiin kahdella eri kontaktirivillä ja mittausriveistä käytettiin kahta keskimmäistä riviä b ja c. Kummastakin mittausriviltä mittapisteitä valittiin 4. Jokaiselta mittapisteeltä mitattiin nelipistemittauksen avulla jännitettä virran

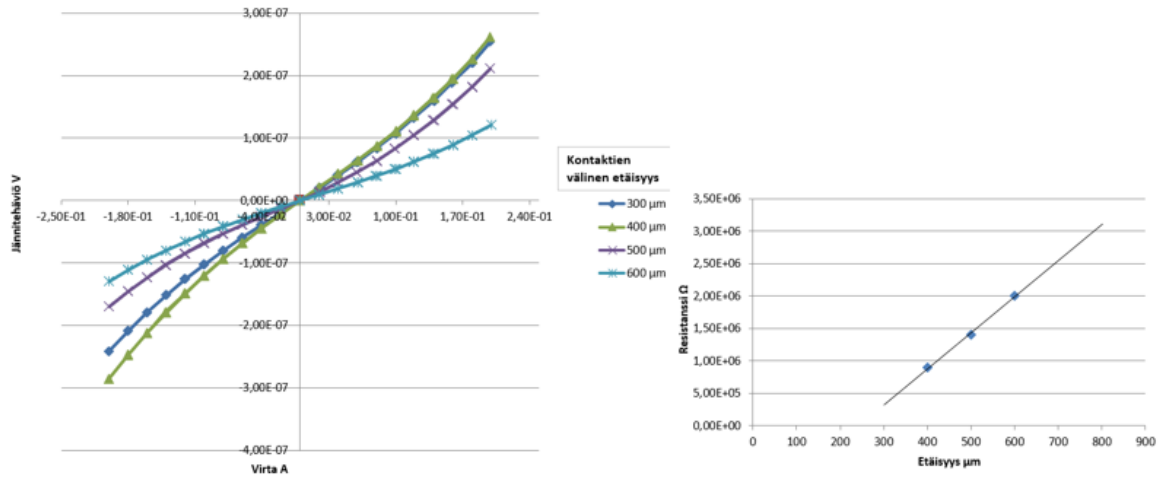
funktiona kahden kontaktin välillä. Mittausalue valittiin siten, että näytteeseen syötetty jännite oli välillä $-200 \text{ mV} - 200 \text{ mV}$. Mitatuista jännitteen arvoista laskettiin jännitehäviö, jonka jälkeen muodostettiin virta-jännitehäviö -kuvaaja. Tästä kuvaajasta määritettiin kulmakerroin, joka on yhtä suuri kuin kokonaisresistanssin käänteisarvo. Lasketuista kokonaisresistanssin käänteisarvoista muodostettiin uusi kuvaaja kokonaisresistanssi kontaktien välisen etäisyyden funktiona, joka tehtiin molemmille mittausriveille erikseen. Tästä kuvaajasta sovitettiin suora, jonka yhtälö on sama kuin kaava 5.

Valmistettu kontakti ennen lämpökäsittelyä osoittautui kuitenkin resistanssimitauksissa hieman Schottky-tyyppiseksi, eikä virta-jännite kuvaaja ollut täysin lineaarinen. Tämän vuoksi sovitukset tehtiin sekä kuvaajan lineaaristen osuuksien avulla, joka oli välillä $-80-80 \text{ mV}$, että koko kuvaajan alueelta. Mittausrivien resistanssin arvot asettuivat kuitenkin melko hyvin suoralle molemmilla kerroilla, kun niistä jätettiin pois yksi mittapiste, joka oli selkeästi erillään muusta suorasta. Kuvaaja ei kuitenkaan ole kovinkaan luotettava, sillä resistanssin arvo pienenee nolnaan ennen kuin kontaktien välinen etäisyys menee nolaksi. Saadut kuvaajat mittausrivistä b on esitetty kuvassa 20.

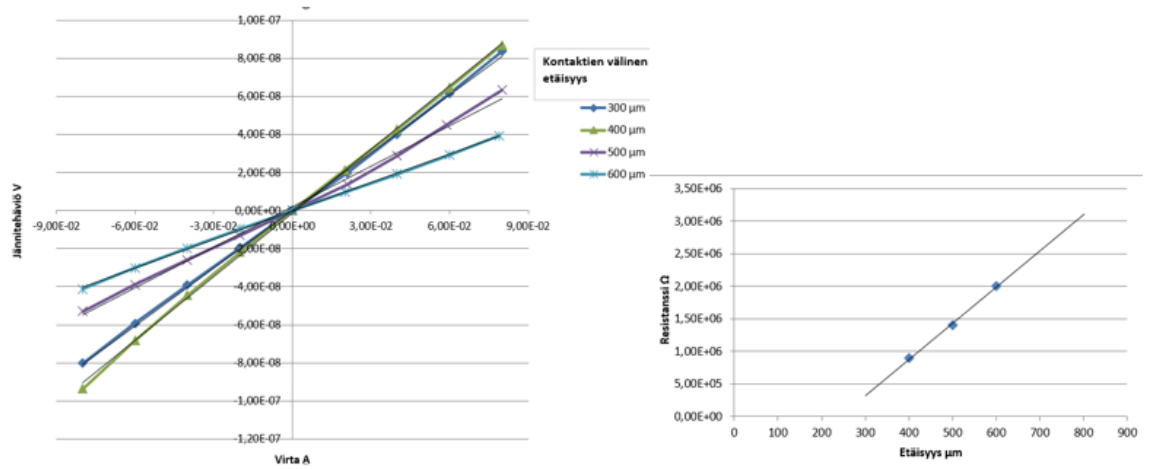
Lämpökäsittelyn jälkeen kontakti oli ohminen molemmilla mittausriveillä. Mittaustuloksissa ei havaittu poikkeavia mittaustuloksia ja kaikki saadut resistanssin arvot asettuivat hyvin suoralle ja vaikuttivat realistisilta, sillä kontaktien välinen etäisyys meni nolaksi ennen kuin resistanssin arvo. Lisäksi c- ja b-kontaktirivin tulokset poikkesivat toisistaan vain vähän ja kontaktien tehollisen pituuden arvo L_T oli molemmissa yhtä suuri. B-rivin mittaustulokset lämpökäsittelyn jälkeen on esitetty kuvassa 21.

Kontaktin ohmisuutta arvioitiin kasvattamalla jännitehäviöaluetta yhdellä mittapisteellä. Kuvassa 22 on esitetty sähköinen mittaus jännitehäviöalueella $-2-2 \text{ V}$. Mittaus suoritettiin b-riviltä, jossa kontaktien välinen etäisyys on $500 \text{ }\mu\text{m}$. Kuvan

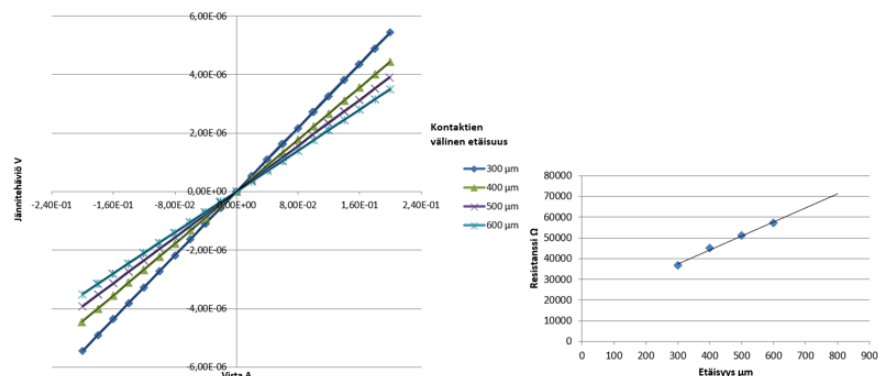
a)



b)



Kuva 20. B-rivistä saadut kuvaajat. Vasemmalla puolella on virta jännitehäviön funktiona ja oikealla puolella kokonaisresistanssi kontaktien välisen etäisyyden funktiona. A-rivin mittaukset on suoritettu jännitehäviöalueella on -200 - 200 mV ja b-rivin -80 - 80 mV. Kuvaajassa nähdään myös helposti, että 300 μm käyrä poikkeaa muista.



Kuva 21. B-rivistä saadut kuvaajat lämpökäsittelyn jälkeen. Vasemmalla puolella on virta jännitehäviön funktiona ja oikealla puolella kokonaisresistanssi kontaktien välisen etäisyyden funktiona. Mittaukset on suoritettu jännitehäviöalueella on -200-200 mV. Kuvaajassa nähdään myös helposti, lineaarinen käyttäytyminen, eli kontakti on ohminen.

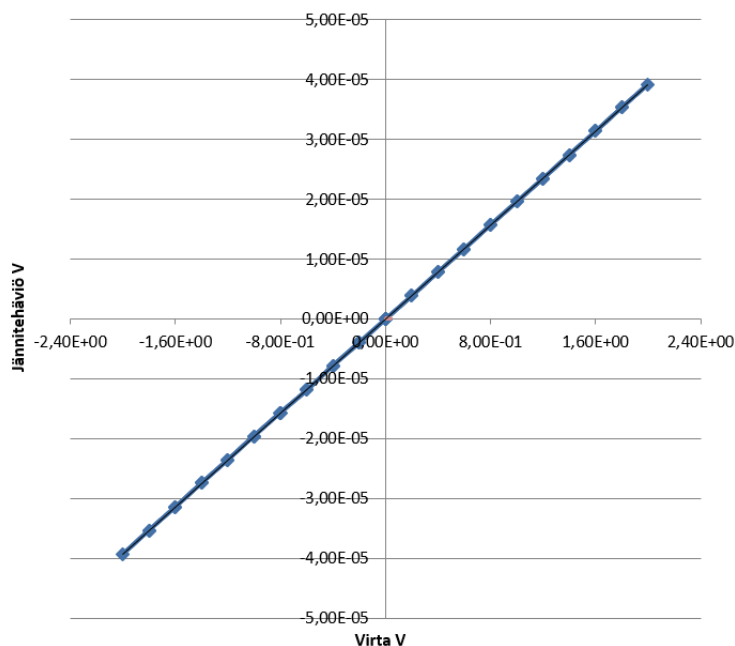
perusteella kontakti on myös ohminen välillä -2-2 V.

Sähköisissä mittauksissa lämpökäsittelyn jälkeen havaittiin myös rakeisuutta. Grodziki ym. on havainnut tutkimuksessaan lämmittämisen aiheuttavan galliumin diffundoitumiseen, joka johtaa parempaan kontaktiin nikkelin ja galliumin välillä. Nikkelin ja galliumin sulautuminen saattoi aiheuttaa myös pinnan rakeisuuden. [12]

4 Yhteenveto

Pintamittausten perusteella KOH-käsittely poistaa oksidikerrosta GaN-pinnalta. KOH-käsittelyn ei kuitenkaan havaittu vahingoittaneen GaN-pintaa. XPS-kuvaajien perusteella voidaan todeta KOH-käsittelyn poistavan ainakin magnesiumoksidia. Lisäksi STS-mittauksissa havaittu energia-aukon muutos KOH-käsittelyn jälkeen osoittaa Fermi-tason siirtyneen kohti valenssivyön maksimia. Tämä puolestaan viittaisi p-tyyppin piristyksen paranemiseen näytteen pinnalla.

Kaikki happi ja hiili ei kuitenkaan hävinnyt näytteestä KOH-käsittelyn jälkeen, eli hiili ja happi ovat muodostaneet erilaisia yhdisteitä ja niitä esiintyy myös syvemmällä kiteessä. Tämä havaitaan esimerkiksi typen 1s XPS-kuvaajassa kuvassa



Kuva 22. B-rivistä saatu kuvaaja kontaktin etäisyydellä 500 μm lämpökäsittelyn jälkeen jännitehäviöalueella -2-2 V, eli kontakti on ohminen.

18 400 eV kohdalla, jossa korkeamman energian komponentti johtuu typen kanssa kitessä olevasta hiilestä ja hapestä. Lisäksi valmistusprosessissa sitoutunut hiili ja happi saattoi näkyä mittauksissa KOH-käsittelyn jälkeen.

Tämä saattoi osittain vaikuttaa myös siihen, ettei kontakti ollut täysin ohminen ennen lämpökäsittelyä. Lämpökäsittelyn jälkeen kontakti kuitenkin muuttui ohmiseksi sähköisten mittausten perusteella.

Vaikka kontaktista onnistuttiin tekemään ohminen, kontaktikuvioinnin laatu ei ollut optimaalinen. Esimerkiksi kontaktikuvioinnin tekeminen optisen litografian avulla ei tuottanut täysin suorakaiteen muotoisia kontakteja ja a- ja d-kontaktirivit olivat heikkolaatuisia.

Koska käytetyt sähköiset mittausten menetelmät olivat tarkoitettu ohmisille kontakteille, saadut kontaktiresistanssin arvot ennen lämmitystä eivät ole kovinkaan luotettavia. Erityisesti lineaarisesta sovituksista aiheutui paljon virhettä ja sen vuoksi saadut kontaktiresistanssin arvot poikkesivat melko paljon toisistaan. Erityisesti c-

rivistä saadut tulokset poikkesivat toisistaan huomattavasti, kun kontaktiresistanssi laskettiin eri jännitehäviöalueella.

Tulosten luotettavuus parani huomattavasti lämpökäsittelyn jälkeen ja kontaktiresistiivisyyden arvot olivat samaa suuruusluokkaa molemmilla mittausriveillä eikä yhtään mittapistettä hylätty. Tämä voisi viitata sputteroinnilla tehdyn metalloinnin huokoisuuteen, jolloin metalonin ja näytteen välinen kontakti on heikko.

Luotettavampien tulosten saaminen olisi vaatinut enemmän uusintamittauksia. Lisäksi metallikontakti olisi voitu valmistaa eri menetelmällä ja GaN-näytteen pinnalle, jolloin valmistusprosessin vaikutuksia olisi voinut arvioida paremmin. Valmistusprosessissa olisi voitu käyttää myös useampaa metallia.

Qiao ym. tutkimuksessa paras ohminen kontakti saavutettiin käyttämällä kontaktin valmistuksessa nikkelin lisäksi kultaa ja lopuksi tekemään lämpökäsittely [23].

Tämän työn perusteella voidaan kuitenkin todeta, että KOH-käsittelyn avulla voidaan poistaa GaN-kiteen natiivioksidikerrosta, joka heikentää ohmisen kontaktin muodostumista. Lisäksi lämpökäsittelyllä voidaan parantaa ohmisen kontaktin muodostumista p-tyypin galliumnitridin ja nikkelin välille.

Viitteet

- [1] W. Gu, X. Wu ja J. Zhang, *Materials Science in Semiconductor Processing* **81**, 89 (2018).
- [2] T. Mori, T. Kozawa, T. Ohwaki, Y. Taga, S. Nagai, S. Yamasaki, S. Asami, N. Shibata ja M. Koike, *Applied Physics Letters* **69**, 3537 (1996).
- [3] S. Pimputkar, *Single Crystals of Electronic Materials: Growth and Properties* (Woodhead Publishing, 2019), pp. 351–399.
- [4] I. Bhat, *Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications* 43 (2019).
- [5] F. H. Yang, *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs): Materials, Technologies and Applications* (Woodhead Publishing, 2014), pp. 27–65.
- [6] S. Liu, S. Zhou, K. Wang, Z. Chen, Z. Gan ja X. Luo, *ICEPT-HDP 2011 Proceedings - 2011 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging* 7 (2011).
- [7] D. K. SCHRODER, *MATERIAL AND DEVICE SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE Third Edition* (A Wiley-Interscience Publication, 2005), pp. 127–138.
- [8] P. Laukkanen, *FFYS7076 Electrical Transport in Solids and Interfaces* (Turun Yliopisto, 2021), No. 1, pp. 1–22.
- [9] H. Adachi ja K. Wasa, *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS: Second Edition* (William Andrew Publishing, 2012), pp. 3–39.
- [10] J. T. Gudmundsson ja D. Lundin, *High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications* (Elsevier, 2020), pp. 1–48.
- [11] A. H. Simon, *Handbook of Thin Film Deposition: Fourth Edition* (William Andrew Publishing, 2018), pp. 195–230.
- [12] M. Grodzicki, P. Mazur, S. Zuber, J. Pers, J. Brona ja A. Ciszewski, *Applied Surface Science* **304**, 24 (2014).
- [13] L. F. Thompson, *Introduction to Microlithography* (PUBLISHER, 1983).
- [14] Y. Vladimírsky, *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy* (Academic Press, 1999), pp. 205–223.
- [15] P. Laukkanen, *FFYS7029 Semiconductor spectroscopy* (Turun Yliopisto, 2021), No. 1, pp. 1–28.

- [16] D. Woodruff, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (Elsevier, 2002), pp. 1–4.
- [17] D. Stiévenard, *Nanoscience: Nanotechnologies and Nanophysics* (PUBLISHER, 2007), pp. 69–89.
- [18] J. M. Hollander, W. L. Jolly Yol, E. Sokolowski, C. Nordling, K. Siegbahn, A. Fysik, S. Hagstrom, Z. Physik, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S.-e. Karlsson, I. Lindgren, B. Lindberg, C. S. Fadley, C. E. Miner, J. M. Hollander ja A. Phys, .
- [19] B. Paisana Ferreira Bouza da Costa, (2019).
- [20] D. Briggs, *Handbook of Adhesion: Second Edition* (PUBLISHER, 2005), pp. 621–622.
- [21] V. M. Airaksinen, *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition* (William Andrew Publishing, 2015), pp. 381–390.
- [22] J. L. Lee, J. K. Kim, J. W. Lee, Y. J. Park ja T. Kim, *Solid-State Electronics* **43**, 435 (1999).
- [23] D. Qiao, *Journal of Applied Physics* **88**, 4196 (2000).
- [24] M. E. Lin, Z. Ma, F. Y. Huang, Z. F. Fan, L. H. Allen ja H. Morkog, .
- [25] J. Makela, M. Tuominen, T. Nieminen, M. Yasir, M. Kuzmin, J. Dahl, M. Punkkinen, P. Laukkanen, K. Kokko, J. Osiecki, K. Schulte, M. Lastusaari, H. Huhtinen ja P. Paturi, *Journal of Physical Chemistry C* **120**, 28591 (2016).
- [26] V. M. Bermudez, *Surface Science Reports* **72**, 147 (2017).