

Elektronisäteilyn vaikutus piikarbiditehotransistorien toimintavarmuuteen

Pro gradu -tutkielma, 30.11.2021

Tekijä:

MIKKO JUHANI LAHTI

Ohjaajat:

KIMMO NISKANEN

ARTO JAVANAINEN



Tiivistelmä

Lahti, Mikko Juhani

Elektronisäteilyn vaikutus piikarbiditehotransistorien toimintavarmuuteen

Pro Gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2021, 68 sivua

Piikarbiditehotransistorit (SiC Power MOSFET) ovat materiaaliominaisuuksiensa puolesta houkutteleva vaihtoehto piipohjaisten tehotransistorien korvaajiksi kriittisissä sovelluksissa, kuten satelliiteissa, ydinvoimaloissa ja sairaaloissa. Kaikissa näissä paikoissa esiintyy säteilyä, joka voi vaikuttaa tehotransistorin toimintavarmuuteen. Säteilyn aiheuttamia yksihiukkasvaurioita on tutkittu jo jonkin verran, mutta kokonaisionisaation aiheuttamat vauriot ovat vähemmän tutkittuja piikarbidikomponenteissa. Tässä pro gradu -tutkielmassa keskitytäänkin tutkimaan toimintavarmuutta tämän kaltaisten kumuloituvien vaurioiden kautta.

Piikarbiditehotransistorien toimintavarmuutta tutkittiin vertaamalla ei-säteilytettyjä ja säteilytettyjä tehotransistoreja keskenään. Säteilynä käytettiin 20 MeV elektroneita ja säteilyannoksena 100 krad (H_2O). Transistorien hajoamista kiihdytettiin käyttämällä transistorin hilalla ylijännitettä ja samalla mitattiin hajoamiseen tarvittava varaus (Charge-to-Breakdown, Q_{BD}). Ylijännitteinä käytettiin kahta eri hilajännitettä, jotka olivat 35,5 V ja 38,3 V. Hilajännitteen ollessa 35,5 V Q_{BD} ei-säteilytetyille transistoriryhmälle oli $(0,287 \pm 0,015)$ C ja säteilytetyille $(0,218 \pm 0,009)$ C. Kun hilajännite oli taas 38,3 V, niin Q_{BD} ei-säteilytetyille ryhmälle oli $(0,025 \pm 0,005)$ C ja säteilytetty $(0,017 \pm 0,004)$ C. Pienemmällä hilajännitteellä rasittaessa havaitaan säteilyn aiheuttama toimintavarmuuden aleneminen, mutta isommalla hilajännitteellä ei.

Toimintavarmuuden lisäksi tutkittiin säteilyn vaikutusta transistorien virta-jännitekäyttäytymiseen. Elektronisäteilyn vaikutuksesta kynnysjännitteen muutokset säteilyteillä transistoriryhmillä olivat $(0,141 \pm 0,006)$ V ja $(0,174 \pm 0,009)$ V.

Avainsanat: tehotransistori, MOSFET, piikarbididi, SiC, elektronisäteily, kynnysjännite, säteily-ympäristö

Abstract

Lahti, Mikko Juhani

Electron irradiation effects on power transistor reliability

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2021, 68 pages.

Material properties of silicon carbide power MOSFETs are an intriguing alternative to silicon based power MOSFETs in critical applications such as in satellites, nuclear powerplants and hospitals. In all of these examples radiation is present which can have an effect on MOSFET reliability. Radiation caused single-effect upsets have already been studied to some extent but total ionizing dose effects are less known in SiC components. In this Master's Thesis we study this total ionizing dose effect.

Reliability of silicon carbide power MOSFETs were studied by comparing not irradiated and irradiated transistors. During radiation, components were exposed to 20 MeV electron beam with a radiation dose of 100 krad (H_2O). Breakdown of transistors were accelerated by using overdrive voltage in transistor's gate and at the same time, charge-to-breakdown (Q_{BD}) was measured. As overdrive voltage we used two different gate voltages, 35,5 V and 38,3 V. When gate voltage was 35,5 V Q_{BD} for not irradiated transistor group was $(0,287 \pm 0,015)$ C and for irradiated $(0,218 \pm 0,009)$ C. On the other hand, when gate voltage was 38,3 V Q_{BD} for not irradiated group was $(0,025 \pm 0,005)$ C and for irradiated $(0,017 \pm 0,004)$ C. With the smaller gate voltage transistors groups can be differentiated from each other but with higher gate voltage this was not possible.

In addition to Q_{BD} measurements, threshold voltage of power transistors was also measured. It was noticed that threshold voltage changes by the effect of electron irradiation. Threshold voltages changed by $(0,141 \pm 0,006)$ V and $(0,174 \pm 0,009)$ V in irradiated transistor groups.

Keywords: power transistor, power MOSFET, silicon carbide, SiC, electron radiation, voltage threshold, radiation environment

Sisällys

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Sanasto	9
1 Johdanto	11
2 Teoreettiset lähtökohdat	13
2.1 Säteily-ympäristö	14
2.1.1 Van Allenin vyöhykkeet	16
2.2 Puolijohteet	17
2.2.1 Energiavyömalli	18
2.2.2 Piikarbidi puolijohteena	19
2.3 Transistorit ja tehotransistorit	20
2.4 Säteilyn aiheuttamat vauriot	22
2.4.1 Kumuloituvat vauriot	23
2.4.1.1 Kokonaisionisaatiovauriot	23
2.4.1.2 Siirtymävirheet	24
2.4.2 Yksihiukkasvauriot	25
2.5 Toimintavarmuus	25
2.5.1 Weibull-jakauma	26
3 Laitteisto ja mittausvalmistelut	31
3.1 Tutkittava tehotransistori ja käytetty mittalaitteisto	31
3.1.1 Tutkittava komponentti	31
3.1.2 Keithley 2410 ja Keithley 2636	33
3.1.3 Multiplekseri ja Arduino Uno	34
3.1.4 Testilevy	35
3.1.5 Lineaarikiikahdytin	36
3.2 Mittausasetelmat	38

3.2.1	IV- ja Q_{BD} -mittaukset	38
3.2.2	Säteilytys	39
3.3	Mittauskoodi	40
4	Mittaukset	43
4.1	Virta-jännite-mittaukset	43
4.2	Hilan rasitusjännitteet Q_{BD} -mittausta varten	45
4.3	Q_{BD} -mittaukset	46
4.4	Säteilymittaukset	46
4.5	Mittauksien kulku	50
5	Tulokset	51
5.1	Säteilyn vaikutus transistorin hajoamiseen	51
5.1.1	Weibull-jakauman johtaminen yhdelle transistoriryhmälle	52
5.1.2	Transistoriryhmien säteilyvaikutuksien vertailu eri hilajännitteillä	56
5.2	Säteilyn vaikutus transistorin virta-jännite-käyttäytymiseen	59
6	Johtopäätökset ja yhteenveto	63
	Lähteet	65

Sanasto

$I_D V_D$ Virta-jännite karakterisointi. Nieluvirta nielujännitteen funktiona.

$I_D V_G$ Virta-jännite karakterisointi. Nieluvirta hilajännitteen funktiona.

$I_G V_G$ Virta-jännite karakterisointi. Hilavirta hilajännitteen funktiona.

EMI Electromagnetic interference. Elektronimagneettinen häiriö.

IV Virta-jännite karakterisointi. Virta- ja jännitemittaukset.

Q_{BD} Charge-to-Breakdown. Transistorin hajoamiseen vaadittavan varauksen määrä.

RAD Säteilymittaus tai säteily.

Weibull jakauma Todennäköisyysjakauma, jota käytetään mm. transistorien toimintavarmuuden selvittämiseen.

1 Johdanto

Nykyaikana elektroniikkaa on käytössä melkein kaikkialla yhteiskunnassa. Muun muassa tietokoneet, kännykät, kodinkoneet ja monet ajoneuvot vaativat elektroniikkaa toimiakseen. Joskus nämä elektroniset laitteet voivat olla käytössä kriittisissä sovelluksissa, kuten vaikka sairaalassa, lentokoneessa tai ydinvoimalassa. Laitteistojen on siis oltava toimintavarmoja.

Yksi toimintavarmuuteen vaikuttavista tekijöistä on ionisoiva säteily, jota esiintyy edellä mainittujen paikkojen lisäksi muun muassa avaruudessa. Satelliitin tai luotaimen lähettäminen avaruuteen on monimutkaista ja kallista. Jos jokin osa hajoaa siellä, niin sen korjaaminen tai vaihtaminen on vaikeaa ellei jopa mahdotonta. Tämän vuoksi on hyvä tietää miten ja minkälaista rasitusta komponentit kestävät.

Tässä työssä tutkitaan juuri piikarbiditehotransistorien toimintavarmuutta rasittamalla näitä komponentteja elektronisäteilyllä. Piikarbiditehotransistori (SiC power MOSFET) on komponenttina melko uusi (2011, [1]). Sen säteilyn kesto on tutkittu jo jonkin verran, mutta pääasiassa yksihiukkasvaurioiden muodossa. Kun taas tässä työssä halutaan tutkia kumuloituvien vaurioiden vaikutusta.

Toimintavarmuutta tutkitaan rasittamalla tehotransistoreita niiden ääriarajoilla, minä vuoksi niiden elinikä lyhenee. Tämä tehdään siksi, että mittaukset saadaan tehtyä järkevässä ajassa. Rasitusmittaus tehdään sekä ei-säteilytetyille että säteilytetyille transistorille eri rasitushilajännitteillä. Näiden mittausten lisäksi tutkitaan mitä säteily tekee transistorin ominaisuuksille käyttäen virta-jännite mittauksia.

Luvussa 2 käydään ensin taustalla olevaa teoriaa ja keskeisiä käsitteitä, jonka jälkeen luvussa 3 esitellään laitteisto ja sen ohjaaminen sekä mittausasetelma. Luvussa 4 taas käydään läpi tarkemmin minkälaiset mittaukset tehtiin ja luvussa 5 esitetään kyseisistä mittauksista saadut tulokset. Lopuksi saatuja tuloksia pohditaan tarkemmin luvussa 6.

2 Teoreettiset lähtökohdat

Tässä luvussa käydään läpi ensin joitakin yleisiä tutkimusalalla käytettyjä suureita. Tämän jälkeen tutustutaan erilaisiin säteily-ympäristöihin, joissa muun muassa transistoreja käytetään. Säteily-ympäristöjen jälkeen pohjustetaan tehotransistoreihin tutustumista käymällä läpi puolijohteiden ja energiavyön käsitteet. Lopuksi tarkastellaan säteilyn aiheuttamia vaurioita ja toimintavarmuuden tutkimusta. Aloitetaan käytetyillä säteilyn yksiköillä.

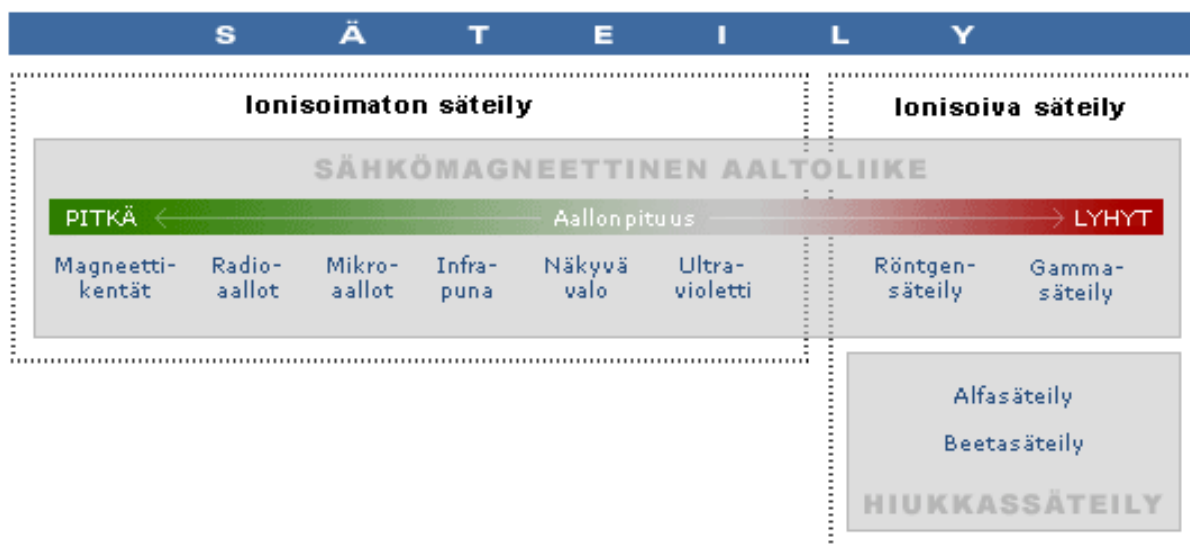
SI-järjestelmässä ionisoivan säteilyn absorboituneelle annokselle käytetään yksikköä gray (Gy). Se kuvaa yhden joulen energian absorboitumista kilogramman massaan. Biologista vaikutusta, eli esimerkiksi säteilyn vaikutusta ihmiseen, tarkastellessa käytetään ekvivalenttiannoksen yksikköä Sievert (Sv). Ekvivalenttiannos (Sv) voidaan laskea absorboituneesta annoksesta (Gy) erilaisien painotuskertoimien avulla. Tässä työssä kuitenkin käytetään absorboitunutta annosta ja sen yksikkönä grayn sijasta rad, jota käytetään paljon alan tutkimuksessa. Näiden muuntosuhte on $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

Muita alan tutkimuksissa käytettyjä termejä ovat vuo (flux) ja kokonaisvuo (fluence). Vuolla kuvataan esimerkiksi hiukkas- tai sähkökentän kulkemista jonkin pinnan läpi. Kokonaisvuo on vuon aikaintegraali, toisin sanoen määrä joka hiukkasia on osunut tietyllä aikavälillä pinta-alayksikköä kohden. Yleisesti käytetty vuon yksikkö on hiukkasta neliösenttiä kohden sekunnissa ($\frac{1}{\text{cm}^2 \text{ s}}$).

Lisäksi voi mainita paljon käytetyn yksikön eli elektronivoltin, jota käytetään muun muassa ionisoivan säteilyn yhteydessä. Yksi elektronivoltti vastaa yhtä voltia kerrottuna alkeisvarauksella eli $1 \text{ eV} = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Tutustutaan seuraavaksi säteily-ympäristöihin.

2.1 Säteily-ympäristö

Säteily voidaan jakaa kuvan 1 mukaisesti ionisoimattomaan ja ionisoivaan säteilyyn. Ionisoimatonta säteilyä ovat muun muassa radio- ja mikroaallot sekä infrapuna. Ionisoiva säteily voidaan jakaa vielä sähkömagneettiseen säteilyyn ja hiukkassäteilyyn. Sähkömagneettiseen säteilyyn kuuluvat muun muassa röntgen- ja gammasäteily, kun taas hiukkassäteilyyn alfa- ja betasäteily.

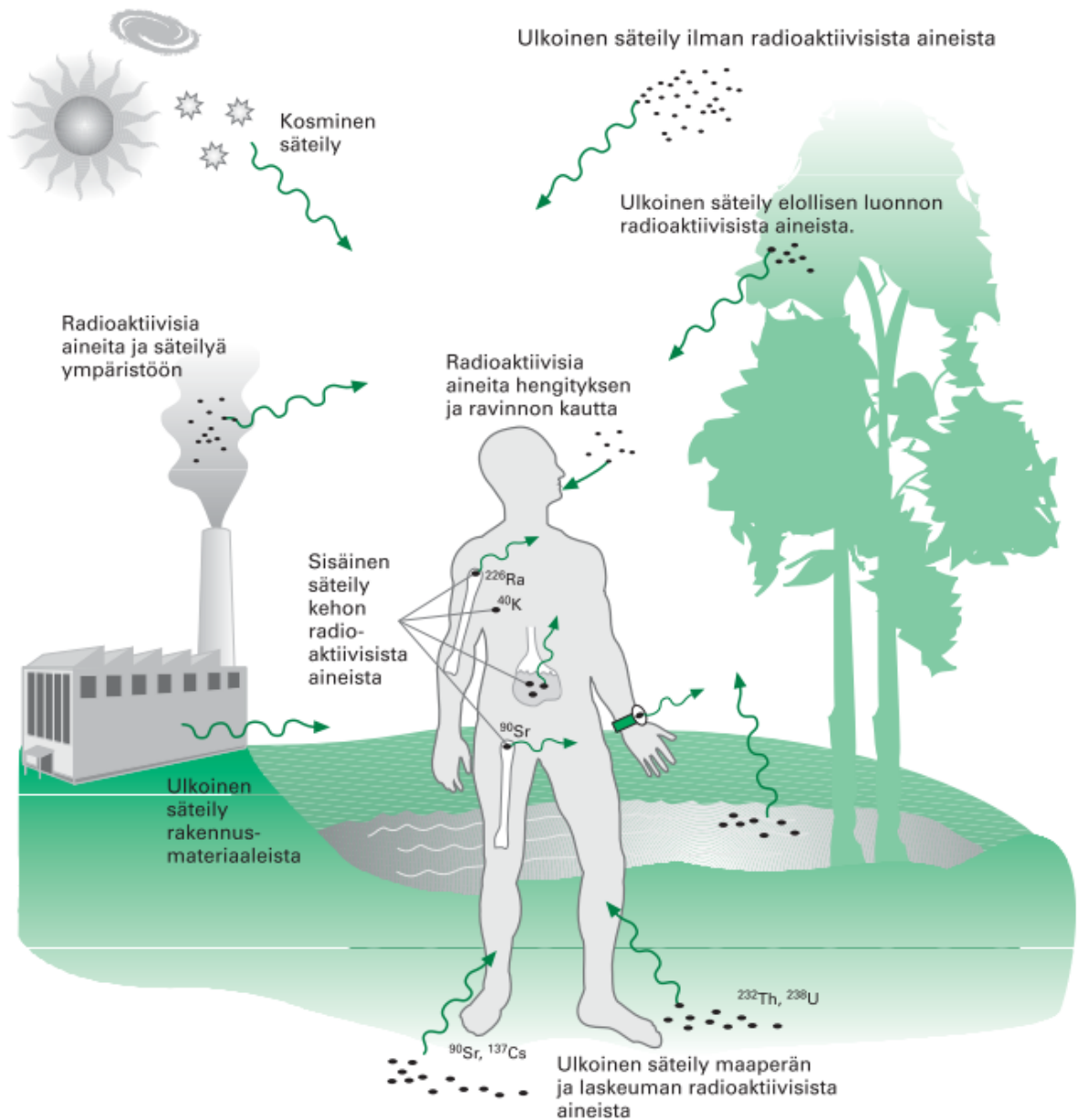


Kuva 1. Säteily voidaan jakaa ionisoimattomaan ja ionisoivaan säteilyyn, joista jälkimmäinen jakaa edelleen sähkömagneettiseen- ja hiukkassäteilyyn [2].

Käydään seuraavaksi läpi eri säteily-ympäristöjä lähtien maanpinnalta ja siirtyen siitä avaruuteen. Koska tässä tutkimuksessa tutkitaan elektronisäteilyn vaikutusta transistorien kestävytyteen, niin pääpainona on avaruuden säteily-ympäristö ja elektronisäteily.

Maapallolla säteilyä on lähes kaikkialla. Kuvassa 2 on eritelty näitä erilaisia säteilyn lähteitä ympäristössä. Esimerkiksi maaperästä tuleva radonsäteily asuntojen sisäilmaan on merkittävä. Suomessa keskimääräinen radonpitoisuus asunnossa on noin $94 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$, joka vastaa noin 4 mSv annosta vuodessa eli noin $0,76 \mu\text{rad}/\text{min}$ [3]. Taustasäteily Suomessa vaihtelee $0,05 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} - 0,30 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ välillä eli noin $0,438 \text{ mSv} - 2,628 \text{ mSv}$ vuodessa tai noin $0,08 \mu\text{rad}/\text{min} - 0,5 \mu\text{rad}/\text{min}$ [4]. Radonsäteily on siis selvästi taustasäteilyä suurempi.

Maaperästä tulevan radonsäteilyn lisäksi säteilyä esiintyy maan päällä muun muassa ydinvoimaloissa, joissa käytetään myös tehotransistoreita. Tai esimerkiksi Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen kiihdytinlaitteiston tuottamana. Säteilyä esiintyy myös ihan radioaktiivisina aineina luonnossa tai avaruudesta tulevana kosmisena säteilyinä. Kosmisella säteilyllä tässä tarkoitetaan Auringosta ja muualta avaruudesta tulevaa hiukkassäteilyä, joka ilmakehään päästessään synnyttää sekundaarisäteilyä [6].



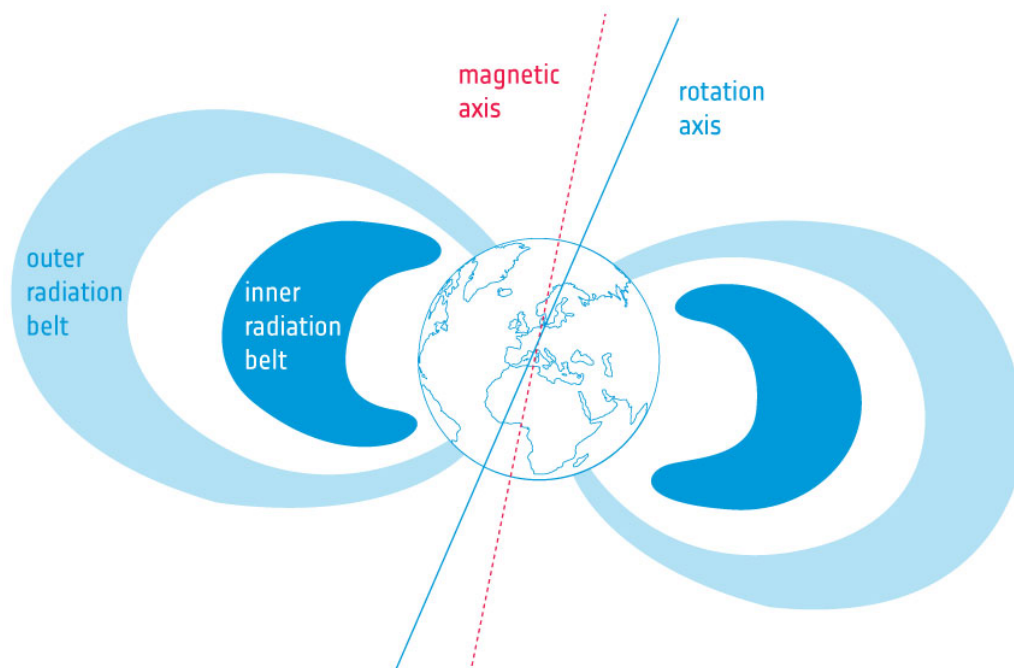
Kuva 2. Säteilyä ja radioaktiivisia aineita ympäristössämme maan päällä [5].

Avaruudessa säteilyä esiintyy esimerkiksi Auringon tuottamana. Auringosta tulee aurinkotuulen mukana plasmää, joka koostuu elektroneista, protoneista, alfahiukkasista ja vähemmässä määrin raskaampien alkuaineiden ytimistä [6]. Näiden energiat ovat vain joitain kiloelektronivolttuja. Auringosta tulee myös korkeaenergiisiä hiukkasia (Solar Energetic Particles, SEP) aurinkoroihujen ja koronapurkauksien seurauksina. Näiden energiat ovat joistain kymmenistä keV useisiin GeV. Aurinkoroihujen protonit jopa 500 GeV [7].

Aurinkokunnan ulkopuolelta tulee galaktista kosmista säteilyä (Galactic Cosmic Rays, GCR), joka on peräisin mm. supernovista. GCR:stä on noin 1% verran elektroneja ja suurimmaksi osaksi atomiytimiä, joista noin 90% protoneja, 9% alfahiukkasia ja loput $\sim 1\%$ raskaampia ioneja. Suurimmat energiat voivat olla jopa $\sim 1 \cdot 10^{21}$ eV [8]. Näiden lisäksi säteilyä esiintyy Van Allenin vyöhykkeillä, joita käsittelemme seuraavaksi.

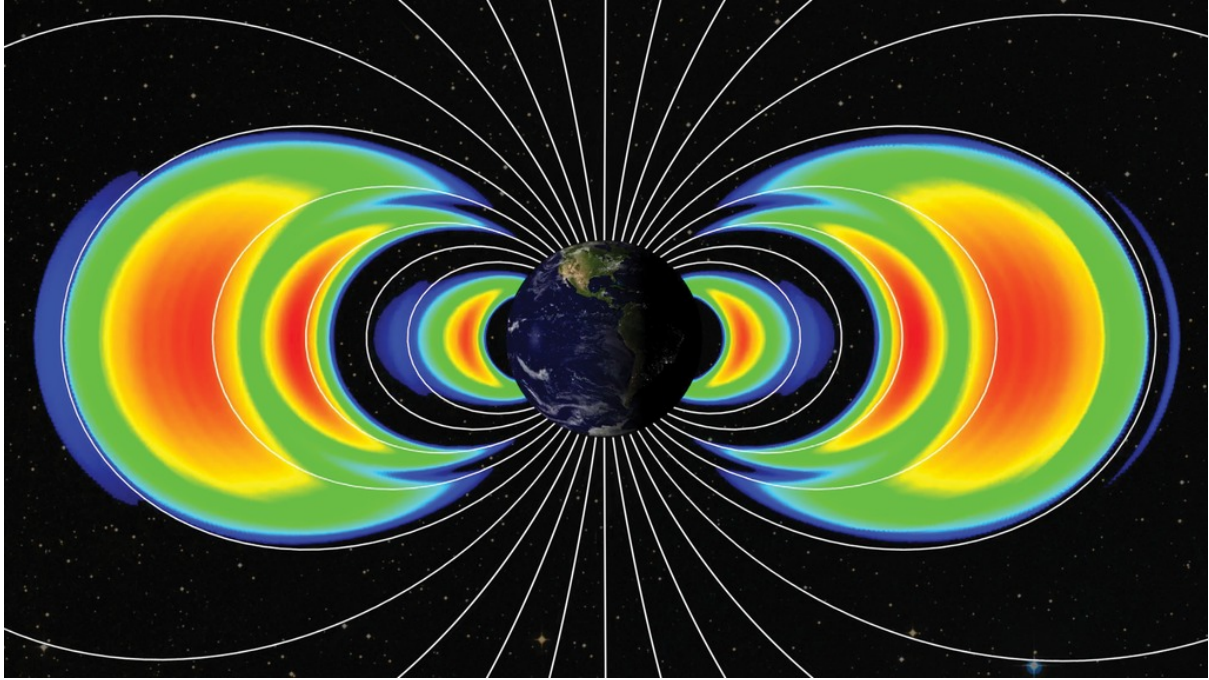
2.1.1 Van Allenin vyöhykkeet

Maapalloa ympäröivän magneettikentän vangiksi jääneet varatut hiukkaset muodostavat vyöhykkeitä, kutsutaan myös nimellä Van Allenin vyöhykkeet. Vyöhykkeitä on havaittu yhteensä kolme, joista kaksi on pysyviä ja ne on esitetty kuvassa 3. Kolmas vyöhyke on havaittu vain tilapäisenä kahden muun vyöhykkeen välissä. Kaikki kolme vyöhykettä on esitettyä kuvassa 4.



Kuva 3. Van Allenin sisempi ja ulompi vyöhyke maapallon magneettisen akselin ympärillä [9].

Sisempi vyöhyke sijaitsee noin 6000 km–12 000 km korkeudessa (maan magneettikentän L-kuoret 1 – 3). Se sisältää jopa 30 MeV elektroneja ja jopa 500 MeV protoneja [7]. Pitkän aikavälin mittauksessa saatiin päivittäiseksi elektronivuoksi noin $2 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \text{ s sr}} - 6 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \text{ s sr}}$ [11].



Kuva 4. Van Allenin kolme vyöhykettä, joista sisin ja uloin vyöhyke pysyviä. Välissä oleva kolmas vyöhyke on tilapäinen [10].

Ulompi vyöhyke sijaitsee taas noin 25 000 km – 45 000 km korkeudessa (L-kuoret 4 – 6). Se sisältää lähinnä elektroneja [11, 12].

Maan päältä ja avaruudesta löytyy siis säteily-ympäristöjä, joissa on samanenergistä elektronisäteilyä kuin tässä työssä on käytetty (20 MeV). Siirrytään seuraavaksi puolijoh-teisiin ja niitä hyödyntäviin transistoreihin. Näin pääsemme käsiksi siihen minkälaista fysiikkaa tutkittavien komponenttien taustalla on.

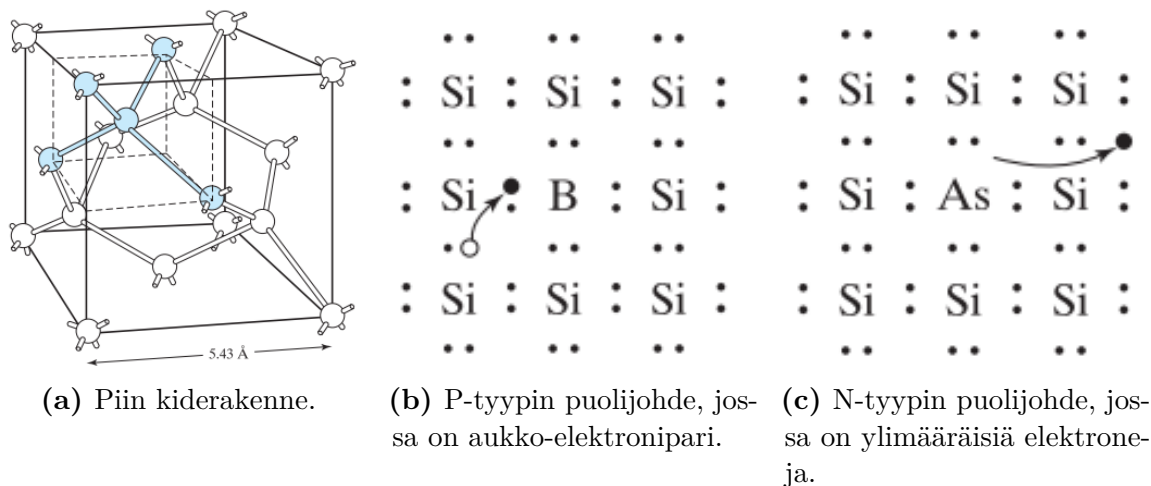
2.2 Puolijohteet

Puolijohteet ovat ryhmä materiaaleja, jotka johtavat sähköä paremmin kuin eristeet, mutta huonommin kuin metallit. Yleisiä puolijohteita ovat jaksollisen järjestelmän ryhmän 14 alkuaineet, kuten pii ja germanium. On olemassa myös puolijohteita, jotka ovat yleensä ryhmien 13 – 15 yhdisteitä. Esimerkiksi tässä työssä tutkittava piikarbidi (SiC) [13].

Kuvassa 5a on esimerkkinä puhtaan piin kiderakenne, jossa jokainen piiatomi on sitoutunut neljään muuhun piiatomiin. Jotta puolijohdemateriaaleja voidaan hyödyntää elektroniikan komponenteissa, täytyy niiden sähköisiä ominaisuuksia muokata seostamalla. Seostamisella tarkoitetaan esimerkiksi boorin tai arseenin hallittua lisäämistä puolijohde-materiaalin kiderakenteeseen. Kuvassa 5b on taas piiatomit ovat yhdessä boorin kanssa, joka on ryhmän 13 alkuaine. Boorilla on yksi valenssielektroni vähemmän kuin piillä, joka

on ryhmän 14 alkuaine. Elektroni liikkuu täyttämään boorin kovalenttisidosta jättäen jälkeensä aukon. Nämä aukot voivat kuljettaa positiivista varausta. Tällaista puolijohdetta kutsutaan p-tyypin puolijohdeksi [14].

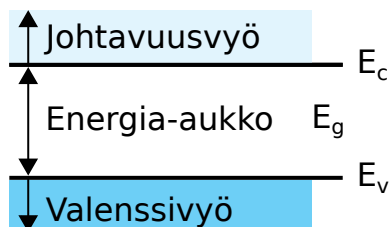
Vastaavasti kuvassa 5c on piiatomit arseeniatomin kanssa. Tässä tapauksessa tosin arseenilla on yksi valenssielektroni enemmän kuin piillä. Tämä elektroni voi karata arseeniatomilta ja liikuttaa negatiivista varausta puolijohdeessa. Tällaista puolijohdetta kutsutaan taas n-tyypin puolijohdeksi [14].



Kuva 5. (a) Jokaisella piiatomilla neljä sidosta kiderakenteessa. (b) Aukot (kuvassa tyhjä ympyrä) ja elektronit (musta ympyrä) kuljettamassa varausta. (c) Ylimääräisiä elektroneja kuljettamassa varausta (kuvat [14]).

2.2.1 Energiavyömalli

Energiavyömallissa ajatellaan, että elektronit voivat olla vain tietyillä tasoilla tai tässä tapauksessa vöillä. Kuvassa 6 näkyy johtavuus- ja valenssivyö sekä näiden väliin jäävä energiatasojen välinen alue eli energia-aukko (band gap). Tämä alue on niin sanottu kielletty alue. Jos energia-aukko $E_g = 0$, niin materiaali toimii johtimena. Jos kyseinen energia on taas suuri, niin materiaali toimii eristimenä [14]. Elektronit pyrkivät asettu-



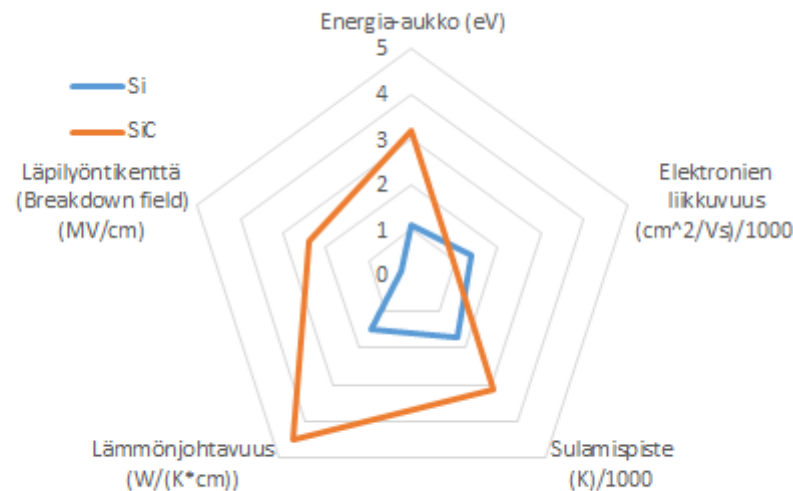
Kuva 6. Puolijohdeenergiadiagrammi [14].

maan matalimmalle energiatasolle E_v eli valenssivyölle. Jos valenssivyöllä oleva elektroni

saa energia-aukon verran energiaa eli E_g , niin kyseinen elektroni siirtyy valenssivyöltä johtavuusvyölle E_c . Johtavuusvyöllä olevat elektronit pystyvät kulkemaan vapaammin ja näin toimimaan varauksenkuljettajina.

2.2.2 Piikarbidi puolijohdeena

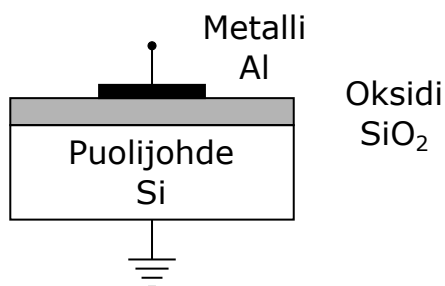
Pii on yleisin puolijohdemateriaali, mutta sen materiaaliominaisuudet eivät ole enää riittävät sellaisissa sovelluksissa, joissa tarvitaan suurta tehotiheyttä ja nopeita taajuuksia. Siitä syystä tehoelektronikan sovelluksissa on alettu käyttämään enenevässä määrin korvaavia materiaaleja. Yksi tällaisista materiaaleista on piikarbidi. Kuvaan 7 on koottu piin ja piikarbidin fysikaalisia ominaisuuksia. Piikarbidilla (SiC) on piihin verrattuna suurempi energia-aukko, läpilyöntikenttä, lämmönjohtavuus ja sulamispiste. Suuremman energia-aukon ja läpilyöntikentän vuoksi piikarbidi kestää isompaa jännitettä kuin pii. Suuremman lämmönjohtavuuden ja sulamispisteen vuoksi sitä on helpompi jäähdyttää ja se kestää korkeampia lämpötiloja [15]. Avaruuden sovelluksiin piikarbidikomponentteja voitaisiin tulevaisuudessa käyttää esimerkiksi sähköisessä propulsiossa ja erilaisissa tehonsäätöyksiköissä [16].



Kuva 7. Piin ja piikarbidin fysikaalisia ominaisuuksia [15].

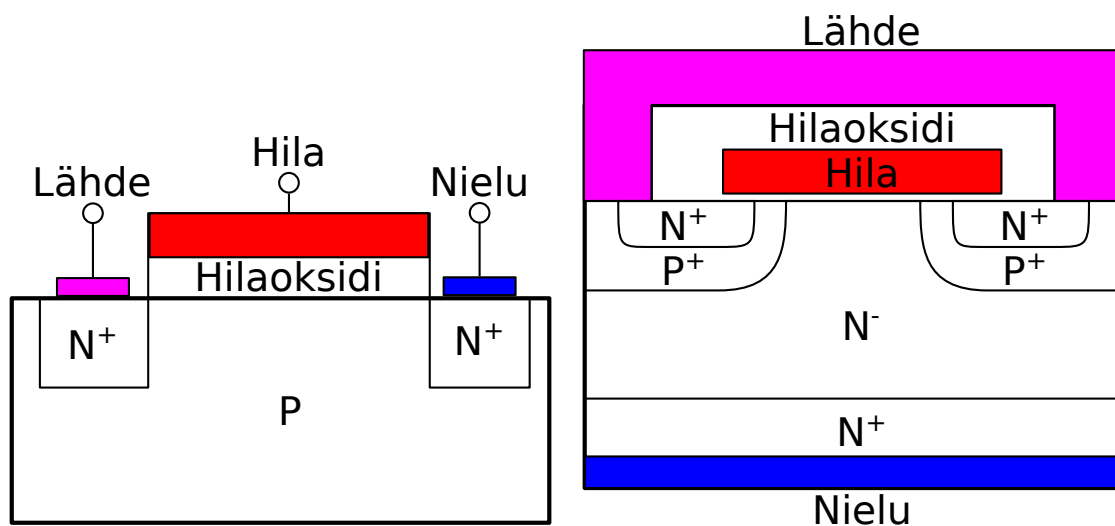
2.3 Transistorit ja tehotransistorit

Metallioksidipuolijohteen (Metal-oxide-semiconductor, MOS) yksinkertainen rakenne on esitetty kuvassa 8. Se koostuu metallista, oksidista ja puolijohdeesta [17]. Piidioksidi estää varauksenkuljettajien pääsyn metallista puolijohdeeseen ja vastaavasti puolijohdeesta metalliin. Se toimii siis sähköisenä eristeenä. Kyseistä rakennetta hyödyntämällä voidaan rakentaa MOSFET eli metallioksidipuolijohdekanavatransistori tai eristehilatransistori.



Kuva 8. MOS rakenne [17].

Kuvassa 9 on esitettynä N-tyyppin transistori ja N-tyyppin tehotransistori. Tärkeimpänä erona tehotransistorien ja normaalien transistorien välillä on, että tehotransistorit kestävät suurempia jännitteitä ja virtoja. Myös niiden rakenteessa on eroa. Siinä missä transistorit ovat horisontaalisessa suunnassa rakennettuja niin tehotransistorit ovat vertikaalisessa suunnassa.



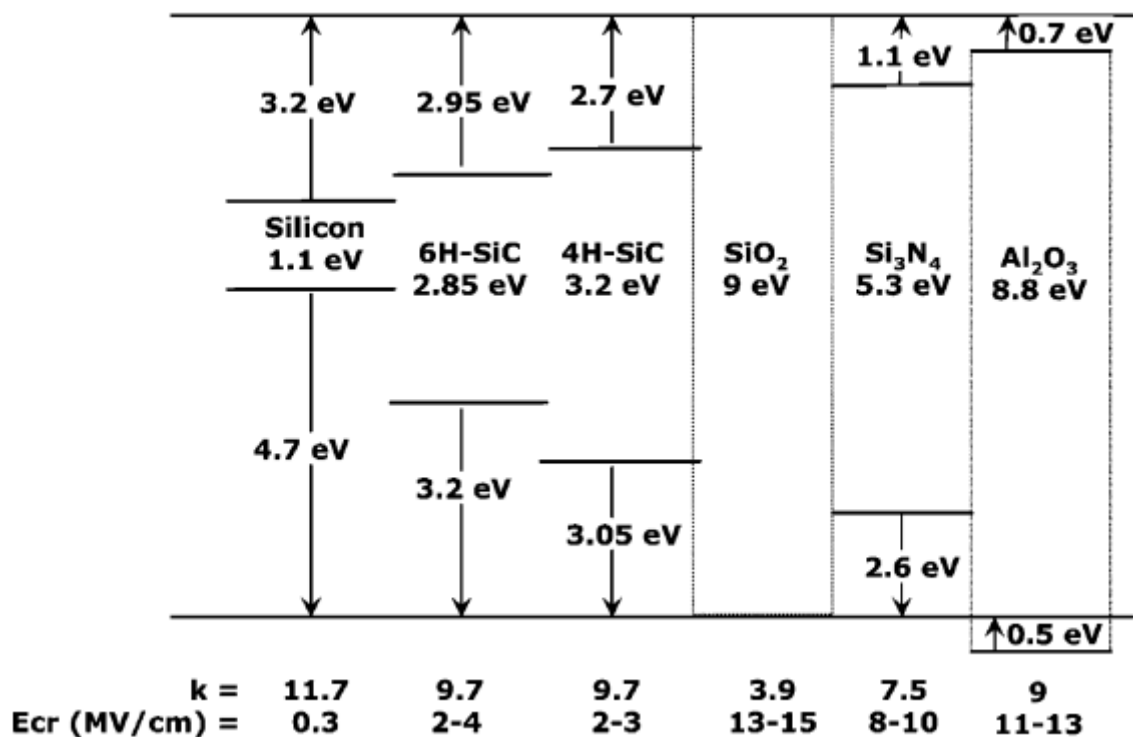
(a) Horisontaalinen N-tyyppin transistori (MOSFET).

(b) Vertikaalinen N-tyyppin tehotransistori (Power MOSFET).

Kuva 9. Transistori ja tehotransistori.

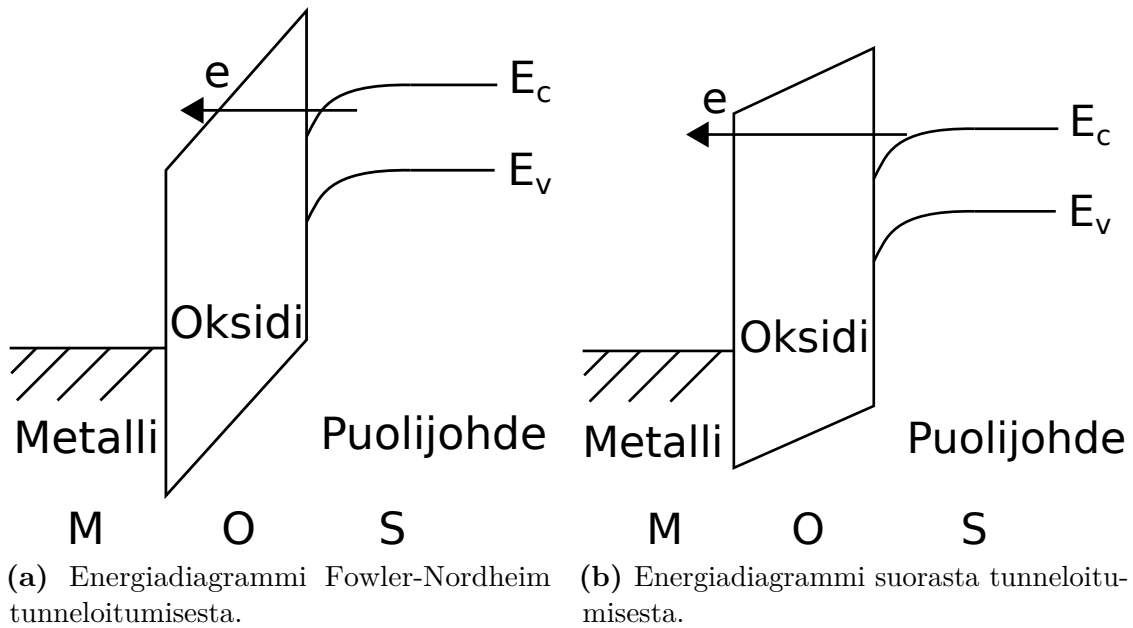
Kuvassa 10 on nähtävissä piin, eri piikarbidien ja oksidien dielektriset vakiot eli suhteelliset permittiivisyydet ja kriittiset sähkökentät. Samassa kuvassa on myös verrattu

piiksidin (SiO_2) johtavuus- ja valenssivöitä muiden aineiden vastaaviin vöihin. Voidaan nähdä, että piikarbideilla (4H-SiC ja 6H-SiC) on suurempi energiatasojen välinen alue (3,2 eV ja 2,85 eV) kuin piillä (1,1 eV). Tämä taas tarkoittaa sitä, että piille voi syntyä enemmän elektroni-aukkopareja kuin piikarbidille [18]. Toisaalta on hyvä huomata myös, että piikarbidin johtavuusvyön etäisyys piidioksidin johtavuusvyöhön on hieman pienempi (2,7 eV ja 2,95 eV) kuin piillä (3,2 eV). Tämä tarkoittaa sitä, että Fowler-Nordheim tunneloituminen on helpompaa piikarbidilla, mikä lisää oksidin vuotovirtaa joka puolestaan voi johtaa lisääntyneisiin luotettavuusongelmiin. Valenssivyöhön etäisyydet taas ovat Si: 4,7 eV, 4H-SiC: 3,05 eV ja 6H-SiC: 3,2 eV [19]. Hilaoksidin paksuudella on iso merkitys transistorin luotettavuudessa [20].



Kuva 10. Piin, piikarbidin ja oksidien dielektriset vakiot sekä kriittiset sähkökentät. Esitettynä myös vertailu piiksidin johtavuus- ja valenssivyöhön [19].

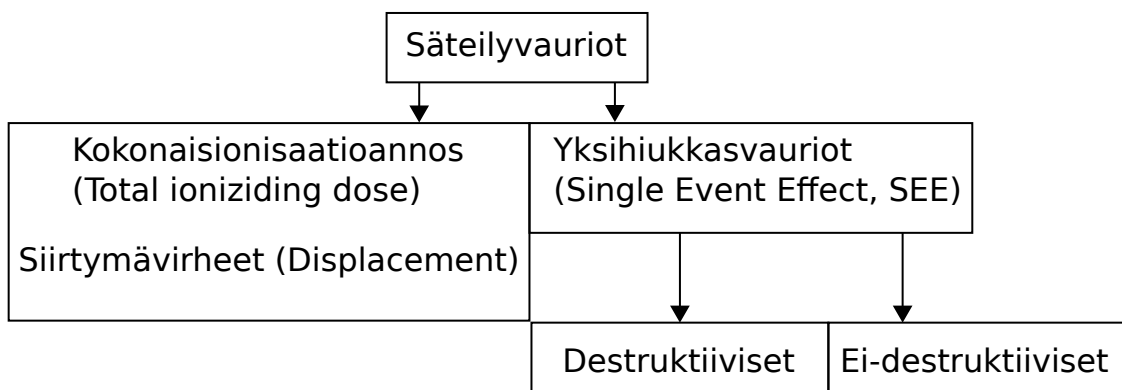
Kuvassa 11 on esitetty Fowler-Nordheim tunneloituminen ja suora tunneloituminen oksidin lävitse. Fowler-Nordheim tunneloitumisessa elektronin läpäisee oksidin joutuen sen johtavuusvyölle. Tämän johtavuusvyön kautta elektroni liikkuu taas metallille. Suorassa tunneloitumisessa elektroni taas läpäisee oksidin ja päättyy suoraan metallille [21].



Kuva 11. Eri tunneloitumistapoja oksidin lävitse. Fowler-Nordheim tunneloitumisessa elektroni läpäisee oksidin ajautuen oksidin johtavuusvyön kautta metallille. Suorassa tunneloitumisessa taas elektroni läpäisee koko oksidin ja ajautuu suoraan metallille.

2.4 Säteilyn aiheuttamat vauriot

Säteilyn aiheuttamat vauriot voidaan jakaa kuvan 12 mukaisesti kahteen osaan: kumuloiuviin vaurioihin ja yksittäisen hiukkasen aiheuttamiin vaurioihin. Kumuloituvien vaurioihin kuuluvat kokonaisionisaation (Total Ionizing Dose, TID) kautta tapahtuvat vauriot ja erilaiset siirtymävirheet (Displacement Damage, DD). Yksittäisen hiukkasen aiheuttamat vauriot (Single Effect Event, SEE) voidaan jakaa vielä destruktiivisiin ja palautuviin häiriöihin (soft error). Aloitetaan kokonaisionisaatiolla ja siirtymävirheillä.



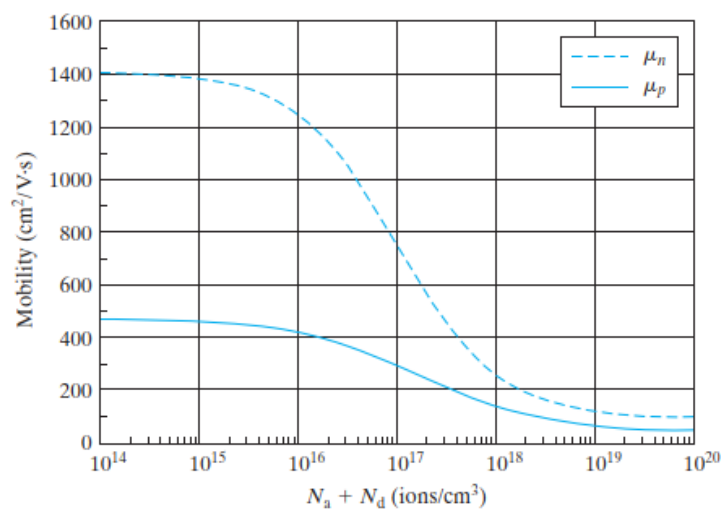
Kuva 12. Säteilyvaurioiden jako kumulatiivisiin ja yksihiukkasvaurioihin. Yksihiukkasvauriot voidaan jakaa vielä destruktiivisiin ja ei-destruktiivisiin vaurioihin.

2.4.1 Kumuloituvat vauriot

Kumuloituvia vaurioita ovat kokonaisionisaation aiheuttamat vauriot ja erilaiset siirtymävirheet.

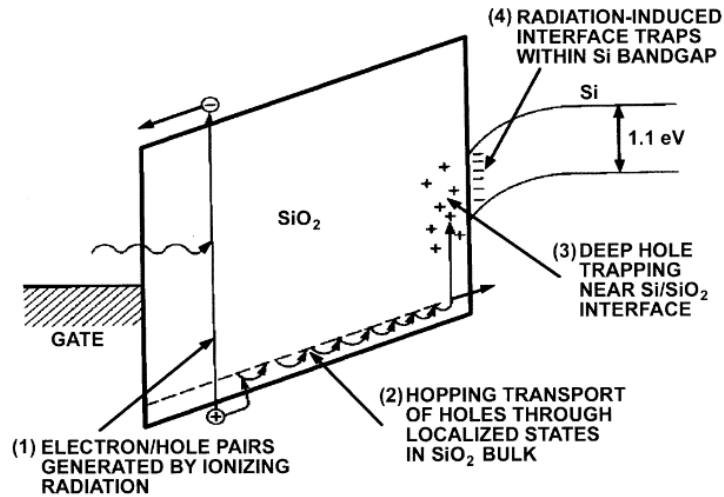
2.4.1.1 Kokonaisionisaatiovauriot

Kokonaisionisaatiossa biasoidun komponentin elektronit siirtyvät pois säteilyn aiheuttamalta ionisointialueelta, mutta hitaammin liikkuvat aukot (kuva 13, [22]) loukkuuntuvat puolijohdemateriaalin rajapinnoille tai piioksiidiin. Nämä loukkuuntuneet aukot vetävät taas puoleensa elektroneja, mikä taas voi aiheuttaa muutoksia komponentin sähköisiin ominaisuuksiin [18, 23].



Kuva 13. Elektronien liikkuvuus μ_n (katkoviivalla) on suurempi kuin aukkojen liikkuvuus μ_p piissä, kun lämpötila on 300 K [22].

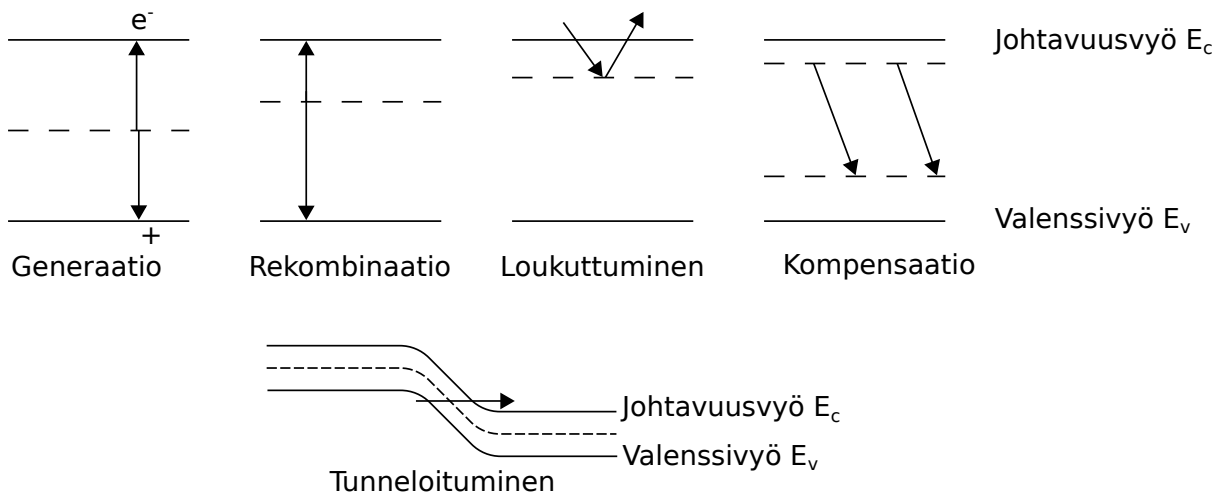
Kuvassa 14 on esitetty energiadiagrammi MOS rakenteelle. Siinä ensimmäisessä askeleessa elektroni-aukkopari generoituu ionisoivan säteilyn vaikutuksesta. Toisessa askeleessa tapahtuu rekombinaatio ja aukkojen liikkuminen oksidissa. Kolmannessa kohdassa aukot jäävät piioksidin ja piin rajapinnalle loukkuun (Oxide Trap). Ja neljännessä askeleessa elektroneja on loukkuuntuneena piin ja piioksidin rajapinnalla (Interface Trap) [18]. Kokonaisionisaatiossa vauriot tapahtuvat siis kumulatiivisesti pitkällä aikavälillä. Yleensä tutkimukset on tehty käyttäen gammasäteilyä ja niissä usein tutkitaan vaikutuksia kynnyksjännitteeseen [24–26]. Tässä tutkimuksessa otetaan erilainen näkökulma ja tutkitaan elektronisäteilyn vaikutusta transistorin toimintavarmuuteen.



Kuva 14. Energiadiagrammi MOS rakenteelle. Rakenteessa elektroni-aukkopari generoituu ja aukko liikkuu oksidissa [18, 23].

2.4.1.2 Siirtymävirheet

Tavallisimpia siirtymävirheitä on esitetty kuvassa 15. Näistä ensimmäisenä on generaatio, jossa valenssi- ja johtavuusvyön välisellä kielletyllä alueella muodostuu elektroni-aukkopari. Rekombinaatiossa elektroni-aukkopari taas häviää. Loukuttumisessa varauksenkuljettaja jää loukkuun rajapinnoille syntyneisiin loukkuihin. Kompensaatioissa taas lähempänä johtavuusvyön energiaa oleva varauksenkuljettaja siirtyy kohti valenssivyötä olevaa kohtaa, johon säteily on tehnyt vaurion. Vaihtoehtoisesti varauksenkuljettaja voi tunneloitua toisen atomin energiatasoille. Joistakin virheistä on mahdollista myös palautua (annealing) [18].



Kuva 15. Tavallisimpia säteilyn aiheuttamia siirtymävirheitä johtavuus- ja valenssivyön välissä.

2.4.2 Yksihiukkasvauriot

Yksihiukkasvaurioita (SEE) ovat ne vauriot, jota yksittäinen energeettinen hiukkanen aiheuttaa osuttuaan sopivaan kohtaan komponentissa. Erona aiempiin kumulatiivisiin vaurioihin on siis se, että jo yksittäinen hiukkanen voi riittää komponentin vaurioutumiseen. SEE vaurioita on useita erilaisia ja ne voivat olla joko destruktiivisia eli hajottavia tai ei-destruktiivisia eli vaurioita, joista komponentti voi vielä palautua (annealing) [18]. Esimerkiksi SEU (Single Event Upset) ja SET (Single Event Transient) ovat ei-destruktiivisia. Esimerkiksi muistikammoissa voi tapahtua niin sanottu bit-flip [27]. Destruktiivisia ovat taas muun muassa SEL (Single Event Latchup) ja SEB (Single Event Burnout) [28]. Piikarbidikomponenttien tiedetään olevan erityisen herkkiä yksihiukkasvaurioille. Niiden on havaittu hajoavan neutroni- ja ionisäteilyn vaikutuksesta. Lisäksi niitä on hajonnut myös selvästi pienemmillä jännitteillä kuin mitä valmistaja on ilmoittanut turvallisiksi rajoiksi komponenteille [29, 30].

2.5 Toimintavarmuus

Luvussa 2.4 käytyjen säteilyn aiheuttamien vaurioiden ja muutoksien lisäksi on tärkeää arvioida komponenttien toimintavarmuutta pitkällä aikavälillä. Esimerkiksi avaruusmissio voi kestää vuosia [31]. On siis tärkeää pystyä arvioimaan kuinka toimintavarmoja komponentit ovat.

Ajan myötä tapahtuva eristekerroksen hajoaminen (Time-Dependent Dielectric Breakdown, TDDDB) on hajoamismekanismi, jossa komponentin oksidikerrokseen pitkällä aikavälillä muodostuneet vauriot lopulta johtavat komponentin hajoamiseen. Tätä hajoamista voidaan kiihdyttää rasittamalla transistoria ylijännitteellä. Transistorien hajoamisaikojen perusteella ennustetaan ekstrapoloimalla kuinka pitkään transistori toimisi sähkökentässä, johon se on suunniteltu. Jos mittauksissa käytetty hilaoksidin sähkökenttä on liian iso (yli $8,5 \frac{MV}{cm}$), niin tuloksien perusteella ekstrapoloitu ennustettu toimintavarmuus piikarbiditehotransistoreille on ollut epätavallisen hyvä. Tämän vuoksi on syytä käyttää pienempää sähkökenttää luotettavampien tuloksien saamiseksi. Sähkökentän lisäksi toimintavarmuuteen vaikuttaa myös oksidin paksuus ja lämpötila [32, 33].

Transistorin hajoamisajan lisäksi tässä työssä määritetään hajoamiseen tarvittava varaus (Charge-to-Breakdown, Q_{BD}). Mittaamme ei-säteilytetyn transistorin hajoamiseen vaadittavan varauksen ja vertaamme sitä säteilytetyn transistorin vastaavaan arvoon. Analyysi hoidetaan käyttämällä luvussa 2.5.1 esiteltävää Weibull-jakaumaa.

2.5.1 Weibull-jakauma

Weibull-jakauma on jatkuva todennäköisyysjakauma, jota käytetään komponentin luotettavuuden arviointiin. Sen avulla voidaan siis arvioida komponentin elinikä tai tarkemmin sanottuna kuinka suuri osa komponenteista on hajonnut esimerkiksi tietyn ajan kuluttua. Tai kuten tässä työssä sitä tullaan käyttämään, tietyn varausmäärän kuluttua.

2-parametrinen Weibullin tiheysfunktio (2-parameter Weibull probability density function, pdf) on

$$f_{pdf}(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta},$$

jossa $f(t) \geq 0$, $\beta > 0$ on muotoparametri (shape parameter) ja η on skaalausparametri tai karakteristinen elinikä. 2-parametrinen Weibullin kertymäfunktio (2-parameter Weibull cumulative distribution function, cdf) on taas

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (1)$$

jossa $\beta > 0$ on muotoparametri ja η on skaalausparametri tai karakteristinen elinikä [34]. Eli samat kuin tiheysfunktiossa. Weibull-jakauman parametrit kokeellisesta datasta voidaan selvittää esimerkiksi graafisesti. Ensimmäisenä järjestetään hajonneet komponentit nousevaan hajoamisajajärjestykseen eli ensin hajonnut ensimmäisenä, toisena hajonnut toisena ja niin edelleen. Tämän jälkeen approksimoidaan näille mediaanijärjestys (median rank, MR)

$$MR \approx \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \cdot 100, \quad (2)$$

jossa i on hajonneen komponentin järjestysnumero (failure order number) ja N on komponenttien määrä. Ottamalla luonnollinen logaritmi kertymäfunktioista (yhtälö (1)) ja siirtämällä termejä saadaan

$$\begin{aligned} \ln(1 - F(t)) &= \ln\left(e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}\right) \\ &= -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta. \end{aligned}$$

Kerrotaan (-1) :llä

$$-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

ja otetaan toinen luonnollinen logaritmi, jolloin edeltävä yhtälö saadaan muotoon

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln\left(\frac{t}{\eta}\right).$$

Tai vaihtoehtoisesti muotoon

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = -\beta \ln(\eta) + \beta \ln(t). \quad (3)$$

Muuttujanvaihoilla

$$y = \ln(-\ln(1 - F(t))) \quad (4)$$

$$a = -\beta \ln(\eta)$$

$$b = \beta \quad (5)$$

yhtälö (3) voidaan esittää suoran yhtälönä

$$y = a + bx. \quad (6)$$

Tällä tavalla voidaan selvittää Weibull-parametrit yksinkertaisella suoransovituksella. β saadaan suoran kulmakertoimenä ja η ratkaisemalla yhtälöstä (4)

$$\ln(\eta) = -\frac{a}{\beta}$$
$$\eta = e^{-a/\beta}. \quad (7)$$

Virheet voimme laskea virheen etenemislailalla [35]

$$\delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial b}\delta b\right)^2}$$
$$\delta\beta = \delta b \quad (8)$$

eli β :n virhe on suoraan suoransovitusparametrin b virhe. Muuttujan η virhe saadaan taas

seuraavasti

$$\begin{aligned}
\delta\eta &= \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial a} \cdot \delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\beta} \cdot \delta\beta\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\partial\eta}{\partial a} \cdot \frac{\partial\eta}{\partial\beta} \cdot \sigma_{a\beta}\right)} \\
&= \sqrt{\left(\frac{\partial(e^{-a/\beta})}{\partial a} \cdot \delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial(e^{-a/\beta})}{\partial\beta} \cdot \delta\beta\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\partial\eta}{\partial a} \cdot \frac{\partial\eta}{\partial\beta} \cdot \sigma_{a\beta}\right)} \\
&= \sqrt{\left(-\frac{e^{-a/\beta}}{\beta} \cdot \delta a\right)^2 + \left((e^{-a/\beta}) \cdot \frac{\partial(-a/\beta)}{\partial\beta} \cdot \delta\beta\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\partial\eta}{\partial a} \cdot \frac{\partial\eta}{\partial\beta} \cdot \sigma_{a\beta}\right)} \\
&= \sqrt{\left(-\frac{e^{-a/\beta}}{\beta} \cdot \delta a\right)^2 + \left(\frac{a \cdot e^{-a/\beta}}{\beta^2} \cdot \delta\beta\right)^2 + \left(-\frac{2 \cdot a \cdot e^{(-2a/\beta)}}{\beta^3} \cdot \sigma_{a\beta}\right)}, \tag{9}
\end{aligned}$$

jossa $\sigma_{a\beta}$ on kovarianssi muuttujien a ja β välillä. Jos muuttujat ovat toisistaan riippuvaisia, niin kovarianssi on nolla [35]. Johdetaan seuraavaksi hajoamisen keskiarvo (Mean Time To Failure, MTTF) ja sen varianssi, jonka kautta saadaan myös keskihajonta. Käytetään hyödyksi tietoa, että gammafunktio on

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx. \tag{10}$$

Keskiarvo $\bar{T} = \mu_X$ voidaan laskea seuraavasti

$$\begin{aligned}
\mu_X &= \int_0^\infty x f_{pdf}(x) dx = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{1}{\eta^{\beta-1}}\right) \int_0^\infty x \cdot x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx \\
&= \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{1}{\eta^{\beta-1}}\right) \int_0^\infty x^\beta e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx \tag{11}
\end{aligned}$$

Tehdään muuttujanvaihdot

$$t = \left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta \iff t^{1/\beta} = \frac{x}{\eta} \tag{12}$$

$$\iff x = \eta \cdot t^{1/\beta} \tag{13}$$

$$dx = \eta \cdot \frac{1}{\beta} \cdot t^{(1/\beta)-1} dt. \tag{14}$$

Nämä muuttujat (yhtälöt (12), (13) ja (14)) sijoitetaan yhtälöön (11), niin saadaan

keskiarvoksi

$$\begin{aligned}\mu_X &= \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{1}{\eta^{\beta-1}}\right) \int_0^\infty x^\beta e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx \\ &= \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{1}{\eta^{\beta-1}}\right) \int_0^\infty \eta^\beta \cdot t \cdot e^{-t^\beta} \cdot \eta \cdot \frac{1}{\beta} \cdot t^{((1/\beta)-1)} dt,\end{aligned}$$

joka sieventyy muotoon

$$\mu_X = \eta \int_0^\infty t^{1/\beta} \cdot e^{-t} dt.$$

Nyt hajoamisen keskiarvo (Mean Time To Failure, MTTF) voidaan ilmaista gammafunktia (Γ , yhtälö (10)) käyttämällä

$$\bar{T} = \mu_X = E(X) = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right). \quad (15)$$

Johdetaan seuraavaksi varianssi σ_X^2 .

$$\begin{aligned}E(X^2) &= \int_0^\infty x^2 \cdot f_{pdf}(x) dx = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \frac{1}{\eta^{\beta-1}} \int_0^\infty x^2 \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx \\ &= \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \frac{1}{\eta^{\beta-1}} \int_0^\infty x^{\beta+1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx\end{aligned}$$

Käyttämällä samoja muuttujanvaihtoja (yhtälöt (12), (13) ja (14)) saadaan $E(X^2)$ muotoon

$$E(X^2) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{1}{\eta^{\beta-1}} \int_0^\infty \eta^{\beta+1} \cdot t^{(\beta+1)/\beta} \cdot e^{-t} \cdot \eta \cdot \frac{1}{\beta} \cdot t^{((1/\beta)-1)} dt,$$

joka sieventyy muotoon

$$E(X^2) = \eta^2 \int_0^\infty e^{-t} \cdot t^{(2/\beta)} dt$$

ja edelleen gammafunktia (yhtälö (10)) käyttämällä

$$E(X^2) = \eta^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right). \quad (16)$$

Varianssi σ_x^2 voidaan nyt laskea keskiarvoa ($E(X)$, yhtälö (15)) ja $E(X^2)$ (yhtälö (16))

käyttäen

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= E(X^2) - (E(X))^2 \\ &= \eta^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(\eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)\right)^2 \\ &= \eta^2 \left(\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2\right)\end{aligned}\tag{17}$$

Keskihajonta saadaan ottamalla yhtälöstä (17) neliöjuuri

$$\sigma_T = \eta \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}\tag{18}$$

ja yhtälöstä (18) edelleen keskiarvon keskivirhe

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\eta \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}}{\sqrt{N}},\tag{19}$$

jossa N on komponenttien määrä.

3 Laitteisto ja mittausvalmistelut

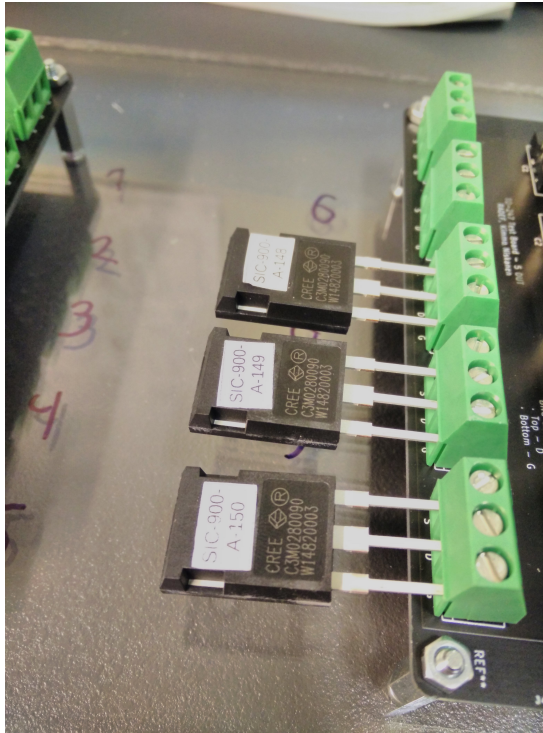
Tässä työssä tutkitaan elektronisäteilyn vaikutusta piikarbidi pohjaisten tehotransistorien toimintavarmuuteen. Tutkimusta tehdään tekemällä mittauksia, jotka käydään tarkemmin läpi luvussa 4. Ennen kuin tutustumme tarkemmin mittauksiin niin käydään läpi käytettyä laitteistoa. Laitteiston lisäksi tarkastelemme sitä miten mittausasetelmat oli toteutettu, miten laitteistoa ohjattiin ja minkälaisia valmisteluja tehtiin ennen varsinaisia mittauksia. Aloitetaan tutustumalla tutkimuksen kohteena olevaan tehotransistoriin ja erilaisiin mittalaitteisiin.

3.1 Tutkittava tehotransistori ja käytetty mittalaitteisto

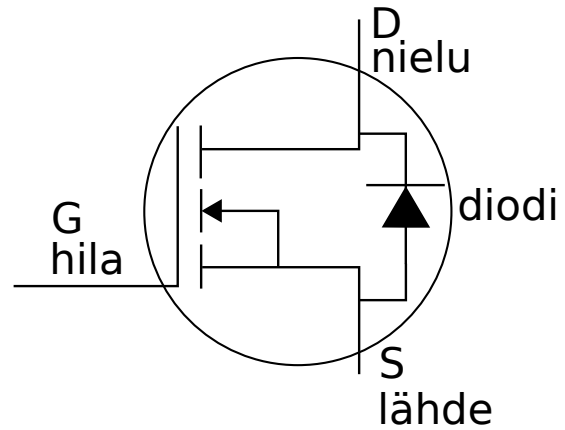
Tutustutaan ensin tutkittavaan tehotransistoriin. Tämän jälkeen käydään laite kerrallaan läpi mitä laitteita kyseisen komponentin tutkimiseen käytettiin.

3.1.1 Tutkittava komponentti

Tutkittava komponentti on n-kanavainen piikarbiditehotransistori C3M0280090D [36], joka on esitetty kuvassa 16. Kyseisessä kuvassa nähdään TO-247-3 pakkauksessa oleva tehotransistori kiinnitettynä testilevyyn sekä tehotransistorin yksinkertainen piirikaavio. Tämän transistorin ja sen mittauksia varten olennaisia, valmistajan turvalliseksi luokittelemia arvoja, on koottu datalehdestä [36] taulukkoon 1. Taulukon arvoista nähdään, että kyseisen tehotransistorin suurin valmistajan turvalliseksi luokittelema arvo nielujännitteelle on 900 V eli $V_{DSmax} = 900 \text{ V}$. V_{GSmax} on taas hilajännitteen suurin arvo. $V_{GS(Th)}$ on transistorin kynnysjännite eli hilajännite, jolla virta pääsee kulkemaan nielulta lähteelle.



(a) Tehotransistoreita kiinnitettynä testilevyn piirilevylle juotettuihin riviliittimiin.



(b) Tehotransistorin yksinkertainen piirikaavio. Kuvassa D on nielu, G on hila ja S on lähde. Näkyvissä myös runkodiodi. Kuva tehty lähteen [36] perusteella.

Kuva 16. (a) Tehotransistori C3M0280090D testilevyssä ja (b) kyseisen transistorin piirikaaviosymboli.

Taulukko 1. Tehotransistorin valmistajan turvalliseksi luokittelemia ominaisuuksia. V_{DSmax} on maksiminelujännite, I_{DSmax} on maksimineluvirta, V_{GS} on hilajännite ja $V_{GS(Th)}$ on transistorin kynnysjännite. Dynaaminen tässä kuvaa tilannetta, jossa hilajännite vaihtuu vähintään kerran sekunnissa maksimi- ja minimijännitteen välillä. Staattinen taas kuvaa tilannetta, jossa hilajännite pysyy vakiona.

	C3M0280090D
V_{DSmax}	900 V
I_{DSmax} jatkuva virta	11,5 A
V_{GSmax} dynaaminen	-8 V / + 19 V
V_{GSop} staattinen	-4 V / + 15 V
$V_{GS(Th)min}$	1,8 V
$V_{GS(Th)}$	2,1 V
$V_{GS(Th)max}$	3,5 V

3.1.2 Keithley 2410 ja Keithley 2636

Keithley 2410 (SN 4104379) ja Keithley 2636 (2008-01801) SourceMeter® mittalaitteet ovat esitetty kuvassa 17. Näiden avulla tehotransistoreille annettiin ja niiltä mitattiin sekä virtaa että jännitettä. Keithley 2410 pystyy mittaamaan ja antamaan virtaa välillä $10 \text{ pA} - 1,05 \text{ A}$. Ja jännitettä lähtien $1 \mu\text{V}$ jopa 1100 V asti, joten sitä käytettiin tehotransistorin nielun tutkimiseen [37]. Keithley 2636 on taas tarkempi kuin Keithley 2410. Se pystyy mittaamaan virtaa jopa $0,1 \text{ fA}$ asti ja suurimmillaan 10 A . Jännitelähteenä Keithley 2636 voi taas toimia välillä $1 \mu\text{V} - 200 \text{ V}$ [38]. Keithley 2636 on siis tarkempi mittaamaan virtaa kuin Keithley 2410, mutta toisaalta Keithley 2636:lla on pienempi maksimijännite. Tämä kyseinen maksimijännite ei riitä transistorin nielujännitteen maksimiin. Virran mittaustarkkuuden ja maksimijännitteen rajoitteen vuoksi Keithley 2636 valjastettiin hilan tutkimista varten.

Mittalaitteiden välille kytkettiin kuvassa 18 valkoisena näkyvä IEEE-488 haaroitin. Tämän haaroittimen ja samassa kuvassa näkyvän GPIB-USB-HS ohjauslaitteen avulla Keithley mittalaitteet yhdistettiin tietokoneeseen, jonka välityksellä mittalaitteita pystyttiin hallitsemaan erikseen. Keithley mittalaitteita hallitaan Python koodin avulla.

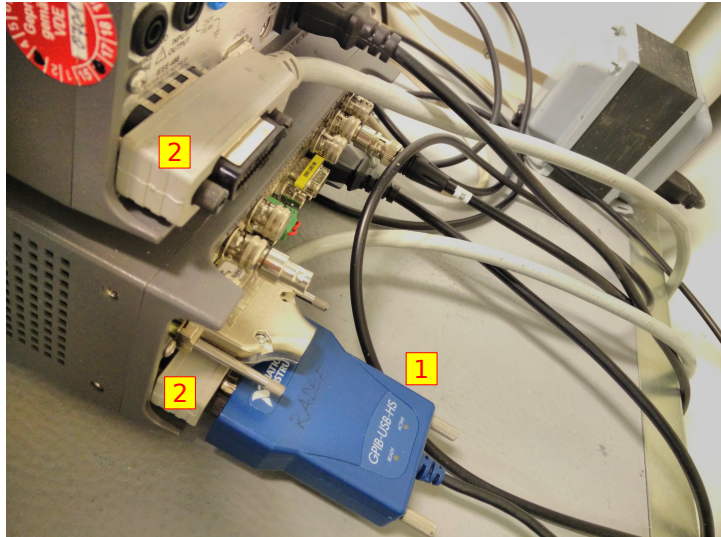


(a) Keithley 2410.



(b) Keithley 2636.

Kuva 17. Keithley 2410 mittalaitetta käytettiin transistorin nielun tutkimiseen ja Keithley 2636 oli käytössä hilan tutkimisessa. Mittalaitteet toimivat myös virta- ja jännitelähteinä.



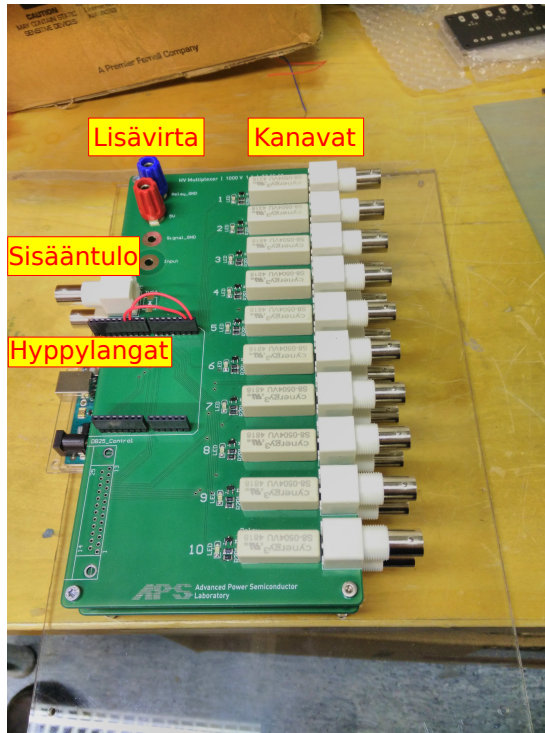
Kuva 18. GPIB-USB-HS ohjauslaite (sininen laite, merkitty numerolla 1) ja IEEE488 haaroittaja (valkoinen johto, merkitty numerolla 2).

3.1.3 Multiplekseri ja Arduino Uno

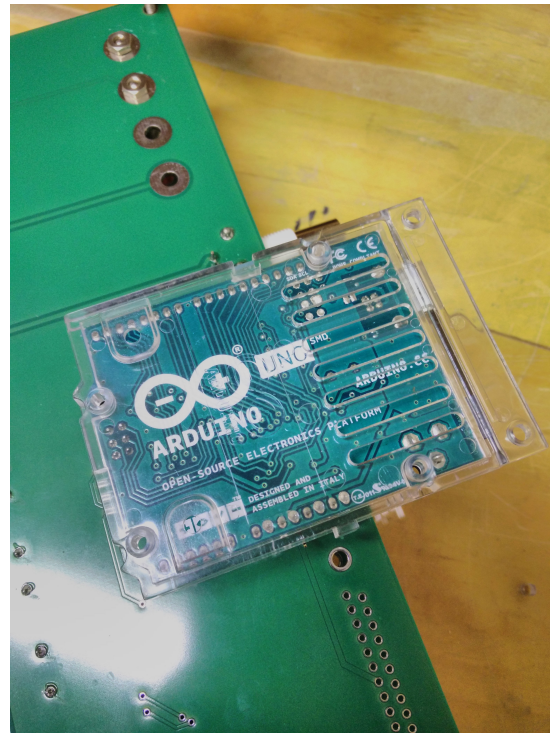
Multiplekseri koostuu kahdesta piirilevystä, joista yksi on hilan ja toinen nielun tutkimista varten. Multiplekserin tehtävä on BNC-kanavien avaaminen ja sulkeminen tutkittavien komponenttien ja teholähteiden välillä. Kanavien avaamista ja sulkemista hallitaan Arduino Unon [39] kautta. Arduino Unon koodi pohjautuu on C/C++ ohjelmointikieleen. Multiplekseri ja Arduino Uno ovat esitettyinä kuvassa 19. Aloitetaan tutustumalla multiplekserin yhden BNC-kanavan aktivoimiseen ja sen jälkeen katsotaan kuinka kaikkia multiplekserin BNC-kanavia voidaan hallita.

Yhden kanavan piirikaavio on esitetty kuvassa 20a. Kuvassa sisääntulo on Keithley mittalaitteilta tuleva virta ja jännite. Releen ollessa kiinni virta ja jännite pääsevät ulos-tulolle, josta ne menevät BNC-kaapelin kautta testilevylle ja sen välityksellä tutkittavalle transistorille. Ohjauksen kautta avataan samassa kuvassa olevan transistorin hila, jonka jälkeen 5 V lisävirtalähdön avulla suljetaan rele ja sytetään LED merkkivalo johtavan kanavan viereen.

Multiplekseri oli aluksi vain kanavilla 3 – 10 toimiva. Tässä työssä siihen lisättiin kanavat 1 ja 2 sekä lisävirtaliitin. Lisävirtaliitin oli tarpeen, koska Arduinon Unon USB väylän antama virta ei riittänyt ohjausreleille mikäli kaikki multiplekserin kanavat haluttiin pitää auki samanaikaisesti. Samalla tehtiin myös muutokset koodin puolelle, jotta kanavat toimivat oikein niitä kutsuttaessa. Kuvassa 20b on esitetty multiplekseri, jossa on näkyvillä sen BNC-kanavat, Keithleyiltä tuleva sisääntulo, Arduino Unon pinniliittimet [40] ja pintaliitokset. Arduino Unon IO2 – IO9 hallitsee Ohjaus 3 – 10, jotka avaavat



(a) Multiplexeri, johon on päivitetty kanavat 1 ja 2 sekä lisätty lisävirtaliittimet.



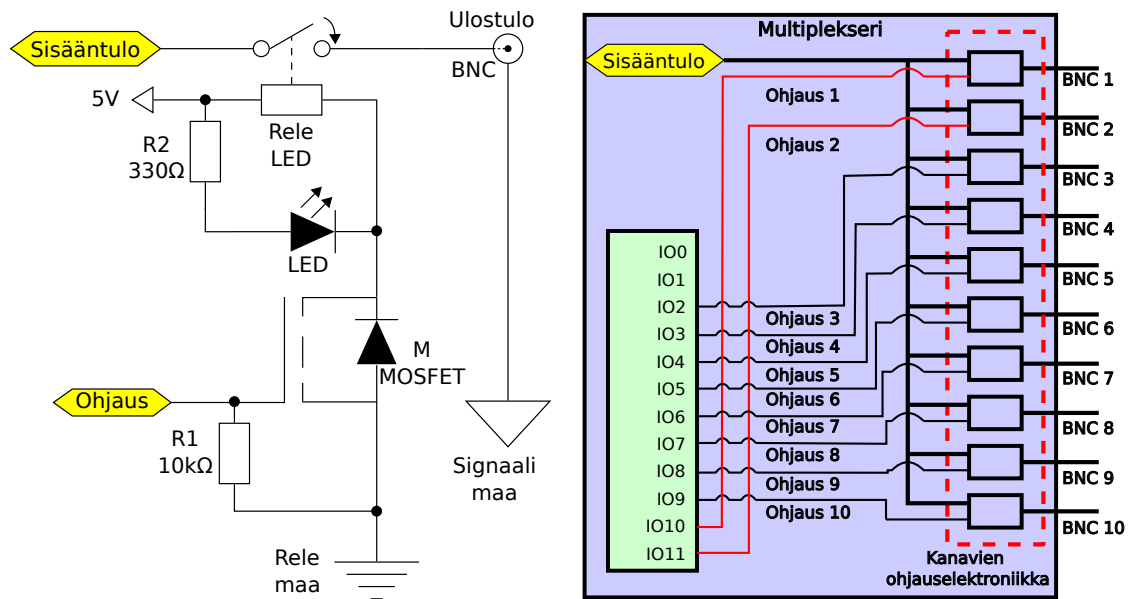
(b) Multiplexerin pohjassa oleva ja kyseistä multiplexeriä ohjaava Arduino Uno.

Kuva 19. Päivitetty multiplexeri ja Arduino Uno. Kuvaan merkitty myös sisääntulo Keithley mittalaitteita varten sekä multiplexerin läpi menevät Arduino Unon pinnit. Nähtävissä on myös hyppylangat, jotka korvaavat Arduino Unon kanavat 0 ja 1 kanavien 10 ja 11 pinneillä.

multipleksierillä Kanava 3 – 10. IO0 ja IO1 on katkaistu pinnit piirilevyjen ja Arduinon väliltä, joten Ohjaus 1 ja 2 on yhdistetty hyppylangoilla IO0 ja IO1 piirilevyjen välisiin pinneihin. Näin ollen Kanava 1 ja Kanava 2 ohjaaminen onnistuu Arduinon IO10 ja IO11 kautta. Katkaistut pinnit näkyvät kuvassa 21.

3.1.4 Testilevy

Kuvassa 22 on nähtävissä testilevy, jossa on kiinnitettynä kolme tehotransistoria ja multiplexerille menevät BNC-kaapelit. Testilevy koostuu piirilevystä, johon juotin kiinni sekä BNC-liittimet että riviliittimet transistorien kiinnittämistä varten. Juotosten ja liittimien toiminnan varmistin yleismittarin jatkuvuustestillä. Piirilevyt kiinnitettiin alustaan polykarbonaattilevystä sahattuun alustaan, jossa piirilevyt saadaan pysymään vakioetäisyydellä toisistaan. Tämä sen takia, jotta transistorit ovat samoilla paikoilla säteilytysten aikana. Yhtenäisen testilevyn liikuttaminen on myös helpompaa kuin kahden erillisen piirilevyn. Testilevyyn porasin myös useamman reiän pylväsporakoneella kaapeleiden



(a) Yhden kanavan ohjauselektronikka.

(b) Katkoviivalla merkityn neliön sisällä kymmenen yhden kanavan ohjauselektronikkaa.

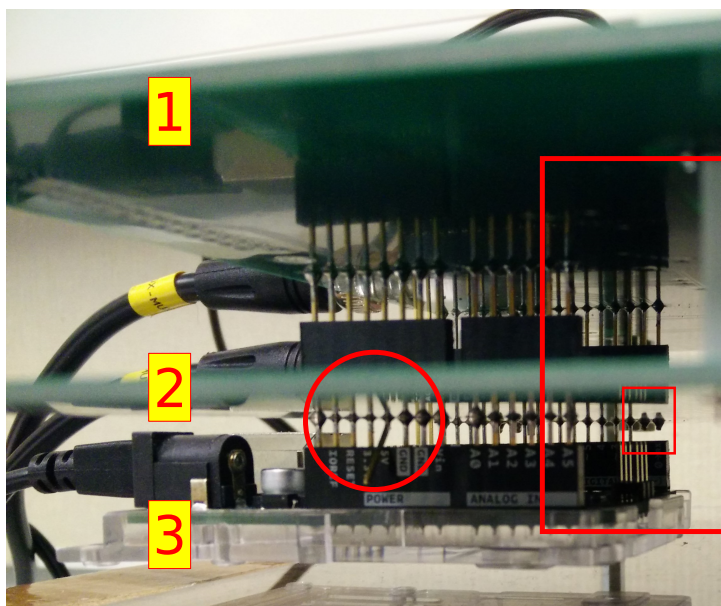
Kuva 20. (a) Yhden kanavan hallinta multiplexerissä. Sisääntuloon tulee Keithley mittalaitteiden lähettämä virta ja jännite kulkee releen ollessa kiinni ulostulon BNC-kaapelin kautta testilevylle. Ohjaus tulee Arduino Unolta ja se avaa kuvassa olevan transistorin hilan, jolloin 5 V lähdöstä tulee virtaa, joka sulkee releen ja sytyttää merkkivalon johtavassa tilassa olevan kanavan viereen.

(b) Multiplexerin kanavien ohjaaminen Arduino Unon avulla. Arduino Unon IO2–IO9 hallitsevat Ohjaus 3–10, jotka avaavat multiplexerillä BNC-kanavat 3–10. Kanavien 1 ja 2 ohjaus tapahtuu Arduinon IO10 ja 11 kautta.

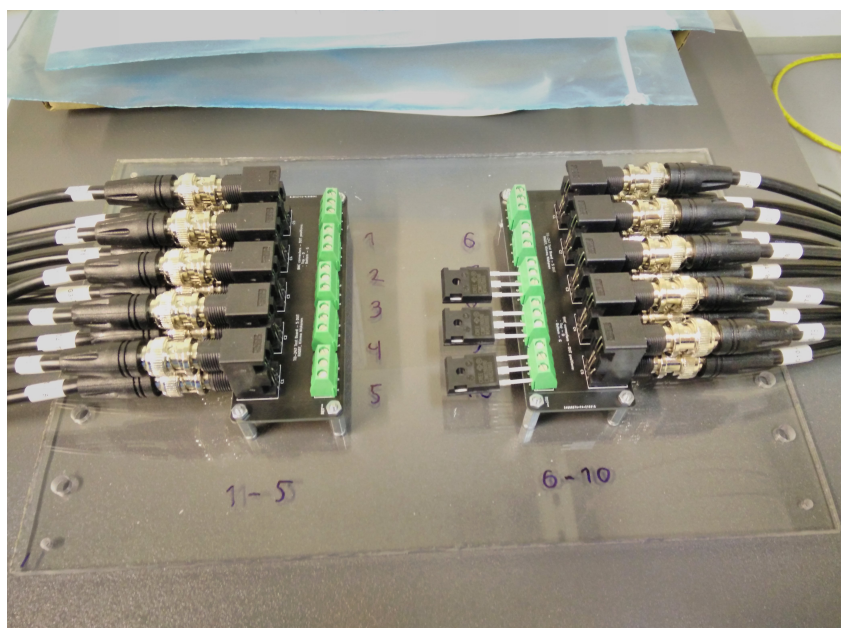
järjestelyä varten.

3.1.5 Lineaarikiihdytin

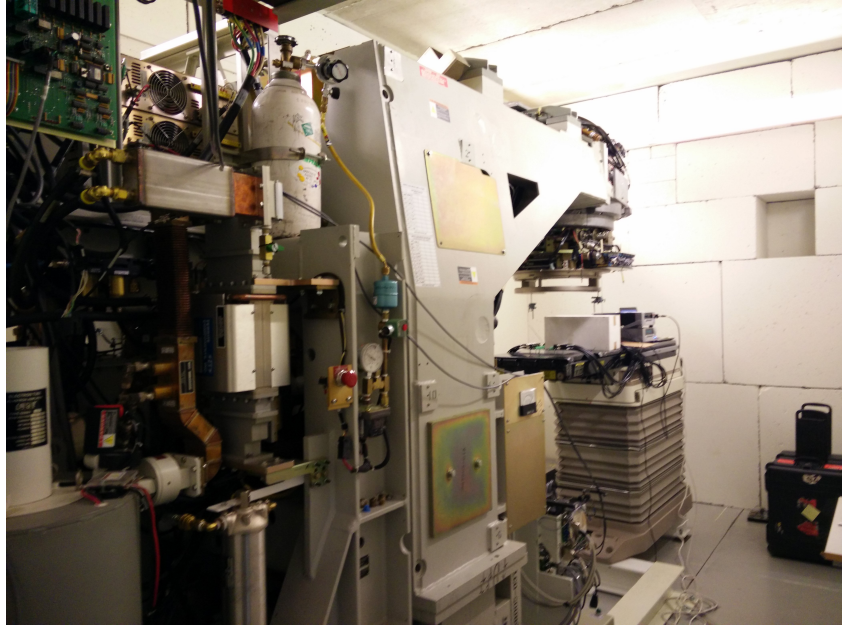
Lineaarikiihdytin on entinen Varian Clinac® sairaalakäyttöön suunniteltu elektronikiihdytin, joka on muutettu RADEF:n käyttötarpeita vastaavaksi. Kyseisellä kiihdyttimellä voidaan tuottaa elektronisuihkun lisäksi röntgensuihkua. Elektronisuihkun energiaksi voidaan valita 6, 9, 12, 16 tai 20 MeV. Röntgensäteilyn energia voidaan taas valita jatkuvan spektrin väliltä 0 MeV – 6 MeV, jolloin intensiteettihiippu on noin 1 MeV kohdalla. Tai leveämmän spektrin väliltä 0 MeV – 15 MeV, jolloin intensiteettihiippu on noin 2 MeV. Annosnopeudeksi voidaan tehdasasetuksilla asettaa elektronien kohdalla 100 rad/min – 1000 rad/min (H₂O) ja röntgensäteilylle 100 rad/min – 600 rad/min (H₂O). Ionisuihkun koko on suurimmillaan 30 cm × 30 cm alue, mutta säteilyalueen kooksi saadaan tarvittaessa jopa yli 80 cm × 80 cm alue [41].



Kuva 21. Multiplexerin läpi menevät Arduino Unon pinnit. 1 on nielun piirilevy, 2 on hilan piirilevy ja 3 on Arduino Uno. Ympyrän sisällä on nähtävissä taitettu 5 V pinni, koska virta multiplexerin levyille tulee lisävirran kautta. Isompi neliö näyttää kuinka pinnit menevät multiplexerin piirilevyjen läpi. Pienemmässä neliössä on katkaistut pinnit, joten Arduino Unon kanavat 0 ja 1 eivät ole käytössä multiplexerillä. Näiden kanavien piirilevyjen läpi meneviin pinneihin on yhdistetty hyppylangalla Arduino Unon kanavat 10 ja 11.



Kuva 22. Testilevyyn kiinnitettynä kolme tehotransistoria kanaviin 8-10. Näkyvissä myös BNC-kaapelit, jotka yhdistyvät multiplexerille.



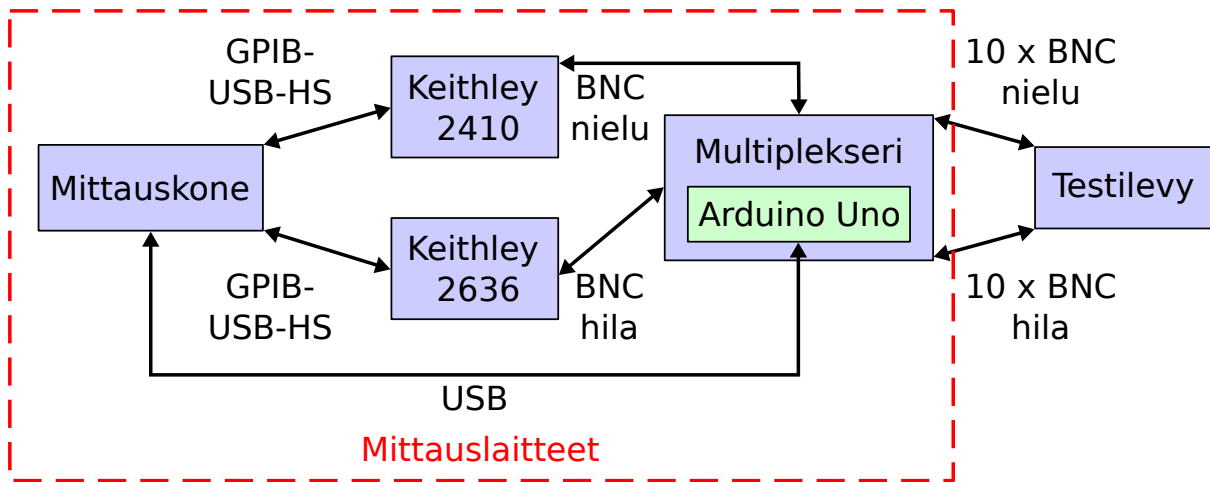
Kuva 23. Varian CLINAC lineaarikiihdytin.

3.2 Mittausasetelmat

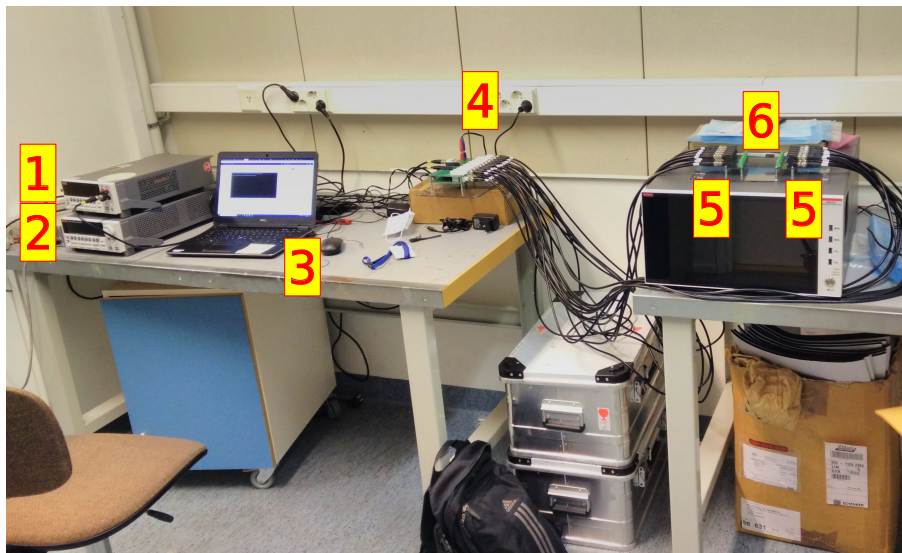
Seuraavaksi käydään läpi käytetyt mittausasetelmat, joita oli kaksi. Ensimmäinen näistä oli tilassa, jossa ei säteilytetty ja toinen tilassa, jossa säteilytettiin. Toisessa mittausasetelmassa säteilytettiin, joten tähän mittaukseen voidaan viitata myös RAD tai IRRAD nimityksillä myöhemmin.

3.2.1 IV- ja Q_{BD} -mittaukset

Ensimmäinen esiteltävä mittausasetelma oli erillisessä huoneessa, jossa tehotransistoreja ei säteilytetty. Tässä tilassa tehtiin IV- eli virta- ja jännitemittauksia sekä Q_{BD} (Charge-to-Breakdown) -mittauksia eli mittauksia, jossa transistori hajotetaan varauksen kertymisen kautta. Tämän asetelman kaaviokuva on esitetty kuvassa 24 ja valokuva kuvassa 25. Mittaustietokone on kytketty GPIB-USB-HS ohjauslaitteella IEEE-488 haaroittimen välityksellä molempiin Keithley mittalaitteisiin. Keithleyt ovat taas yhdistetty kahdella BNC-kaapeleilla (yksi nielulle, toinen hilalle) multiplekserille. Mittaustietokone on yhdistetty myös Arduino Unolle ja sen kautta multiplekserille. Multiplekseri on taas yhdistetty eteenpäin testilevylle 20 BNC-kaapelin välityksellä. Kymmenen näistä on hilan mittaamista varten ja toiset kymmenen nielun mittaamista varten.



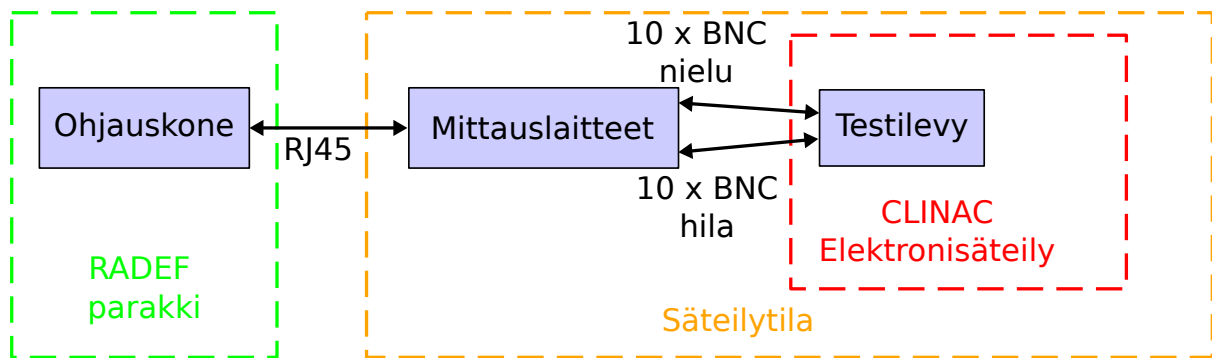
Kuva 24. Kaaviokuva IV- ja QBD-mittaukselle erillisessä huoneessa. Käytössä on vain yksi GPIB-USB-HS ohjauslaite, mutta se on yhdistetty IEEE-488 haaroittimella molempiin Keithley mittalaitteisiin. Punaisella katkoviivalla merkitty mittalaitteet, joihin viitataan myöhemmin kuvassa 26.



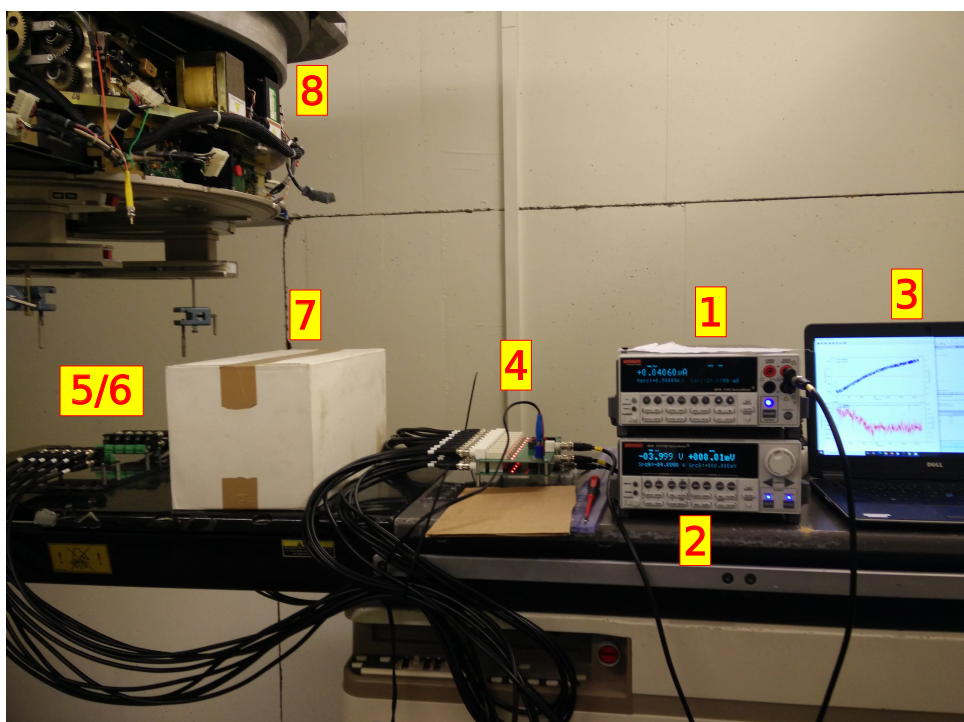
Kuva 25. Mittausasetelma erillisessä huoneessa. Kuvassa numerolla 1 on merkitty Keithley 2410, 2 on Keithley 2636, 3 on mittaustietokone, 4 on multiplekseri ja Arduino Uno, 5 on testilevy ja 6 on tehotransistorit kiinnitettynä testilevyyn.

3.2.2 Säteilytys

Kuvassa 26 on esitetty säteilymittauksen kytkentä, joka on pääpiirteiltään sama kuin edellisessä asetelmassa. Sama kytkentä valokuvana kuvassa 27. Eroina on kuitenkin, että mittauslaitteisto on säteilytilassa. Tässä tilassa tehotransistoreja säteilytetään lineaari-kiihdyttimellä, johon tutustumme aiemmin luvussa 3.1.5. Etäohjauskone on RADEF:n parakissa, josta kyseinen kone on yhdistetty mittaustietokoneeseen RJ45 kaapelilla.



Kuva 26. Kaaviokuva mittauksille säteilytilassa. Erillisessä parakissa on ohjauskone, jonka kautta ohjataan säteilytilassa olevia (kuvan 24 punainen neliö) mittauslaitteita ja säteilytetään testilevyllä olevat tehotransistorit.



Kuva 27. Mittausasetelma säteilyhuoneessa. Kuvassa samat numerot kuin aiemmassa mittausasetelmassa eli numero 1 on Keithley 2410, 2 on Keithley 2636, 3 on mitaustietokone, johon RJ45 kaapeli on kiinnitetty, 4 on multiplekseri, 5 on testilevy ja 6 on tehotransistorit. Lisäksi 7 on parafiiniharkot ja 8 on lineaarikiihdytin. Ennen mittauksen alkamista parafiiniharkkoja kasattiin useampi päällekkäin.

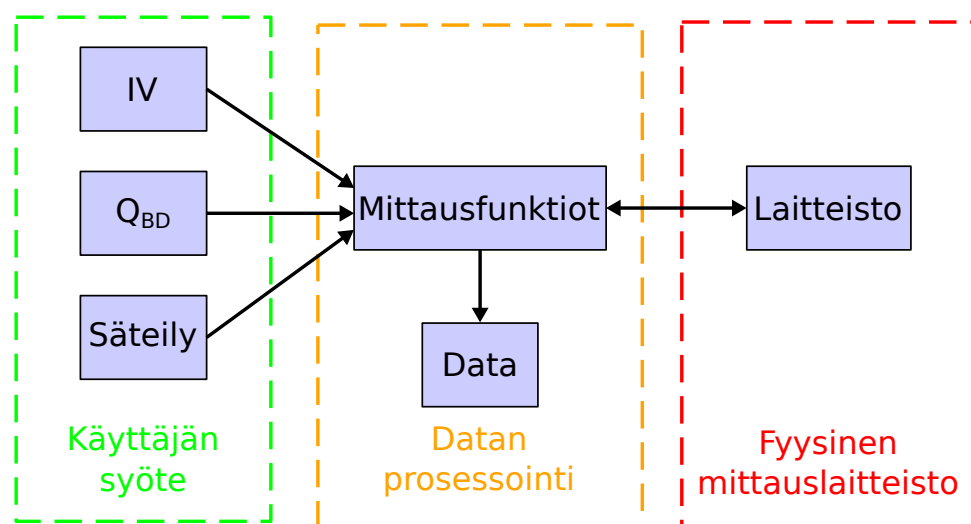
3.3 Mittauskoodi

Laitteiston käyttöä varten koodattiin ohjelmiston. Koodaaminen aloitettiin tutustumalla aiemmin luotuihin koodeihin, joilla ohjataan Arduinon kautta multiplekseriä. Multiplekseriä muutettiin lisäämällä siihen kaksi kanavaa, kanavat 1 ja 2. Ensimmäinen vaihe koodauksesta keskittyikin näiden kanavien toimintakuntoisiksi saamiseen vanhassa koo-

dissa.

Koodauksen toisessa vaiheessa tutustuttiin Keithley mittalaitteiden ohjaamiseen ja datan keräämiseen niiden avulla. Kirjoitettiin yleisluontoisia funktioita, joiden avulla on mahdollista tehdä gradussa tarvittavat mittaukset ja joita on myös muiden mahdollista käyttää myöhemmin. Näitä funktioita käyttämällä on mahdollista suorittaa säteilymittaus, Q_{BD} -mittaus ja IV-mittaukset.

Kolmannessa vaiheessa koodausta laadittiin ohjelmat mittausdatan keräämistä varten. Kirjoitettiin kolme erillistä tiedostoa eli jokaiselle mittaustyyppille oma tiedosto, joiden kautta kutsutaan aiemmin ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa kirjoitettuja funktioita sekä aiemmin kirjoitettua koodia. Mittauskoodeja on mahdollista kutsua suoraan komentoriviltä syöttämällä sille kussakin mittauksessa käytetyt arvot. Havainnollistava kuva koodin rakenteesta on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Kaaviokuva mittauskoodin rakenteesta. Käyttäjän syötteessä annetaan mittauksissa käytettävät arvot. Datan prosessoinnissa taas mittausfunktiot kommunikoivat fyysisen mittauslaitteiston kanssa, esittävät mittausarvot graafisena ja tallentavat mitatut arvot.

4 Mittaukset

Tässä luvussa käydään läpi työssä tehdyt mittaukset. Mittauksien päälajeja oli kolme: virta-jännite-mittaukset (IV), rasitusmittaukset (Q_{BD}) ja säteilymittaukset (RAD). Näiden lisäksi tehtiin myös kiihdyttimen mahdollisesti aiheuttaman häiriön mittaaminen (EMI) ennen varsinaista säteilymittausta. Lopuksi kootaan mittauksista kaksi yhtenäistä mittaustyyppiä: mittaukset ilman säteilytystä ja mittaukset säteilytyksen kanssa.

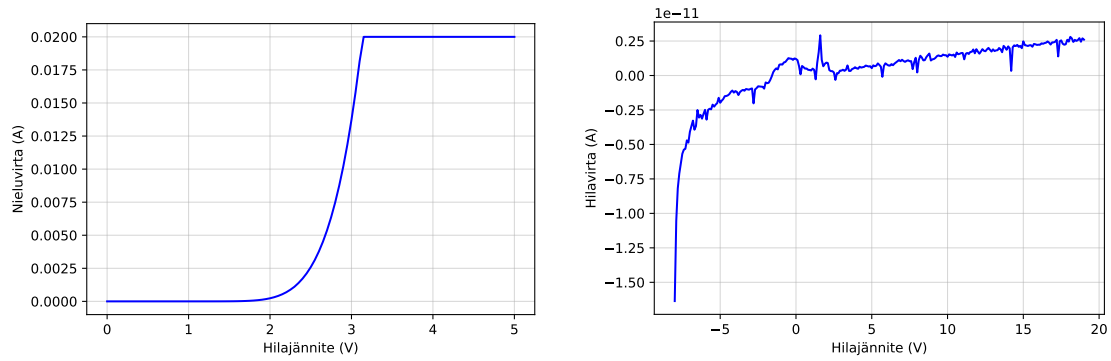
4.1 Virta-jännite-mittaukset

Virta-jännite-mittauksilla selvitettiin onko säteilytys aiheuttanut muutoksia transistorin ominaisuuksiin, kuten kynnysjännitteeseen ja hilan vuotovirtaan. Tässä luvussa mainitut mittaukset suoritettiin ennen ja jälkeen säteilytyksen.

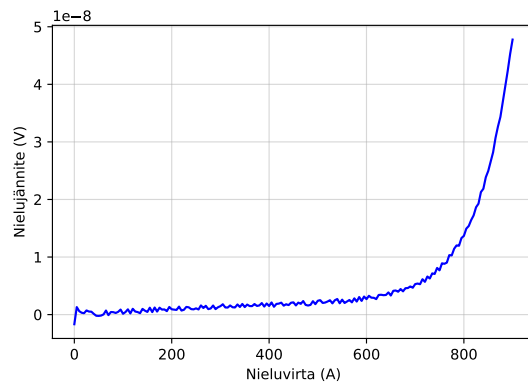
Virta-jännite-mittauksissa eli IV-mittauksissa mitattiin nielu- ja hilavirta hilajännitteen funktiona sekä nieluvirta nielujännitteen funktiona eli $I_D V_G$ -, $I_G V_G$ - ja $I_D V_D$ -käyrät. $I_D V_G$ mitattiin ensin. Siinä käytiin läpi hilajännitteen väli $0\text{ V} - 5\text{ V}$ noin 50 mV välein (askelin) ja nielujännite pidettiin vakiona $V_D = 20\text{ V}$. $I_G V_G$ mittauksessa taas mitattiin hilajännitteen väli $-8\text{ V} - 19\text{ V}$ käyttäen noin 100 mV väliä ja nielujännite pidettiin vakiona $V_D = 0\text{ V}$. $I_D V_D$ tapauksessa läpikäytävä nielujännitteen väli oli $0\text{ V} - 900\text{ V}$, jota mitattiin 5 V välein hilajännitteen ollessa $V_G = 0\text{ V}$. Samat mittauksissa käytetyt arvot ovat nähtävissä myös taulukossa 2. Yhden transistorin esimerkkikuvaajat eri virta-jännite mittauksista ovat nähtävissä kuvassa 29. Kuvassa 30 on taas esitetty kuinka Keithley virta-jännitelaitteet ovat kytketty kiinni transistoriin.

Taulukko 2. IV mittauksissa asetetut alkuarvot. Lihavoituna mittauksen aikana läpikäytävä väli ja eritelty muuttujat, jotka pidetään vakiona.

	hilajännite	nielujännite
$I_D V_G$	$0\text{ V} - 5\text{ V}$	20 V , vakio
$I_G V_G$	$-8\text{ V} - 19\text{ V}$	0 V , vakio
$I_D V_D$	0 V , vakio	$0\text{ V} - 900\text{ V}$

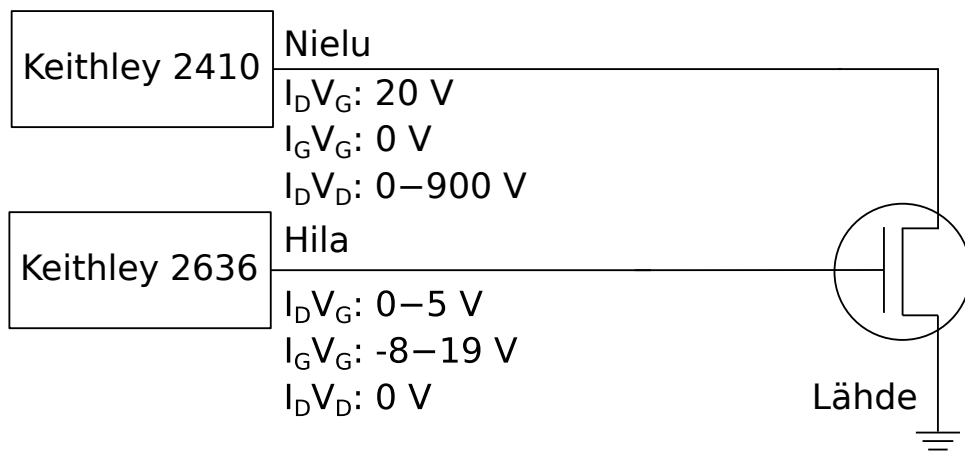


(a) Nieluvirta hilajännitteen funktiona eli $I_D V_G$. (b) Hilavirta hilajännitteen funktiona eli $I_G V_G$.



(c) Nieluvirta nielujännitteen funktiona eli $I_D V_D$.

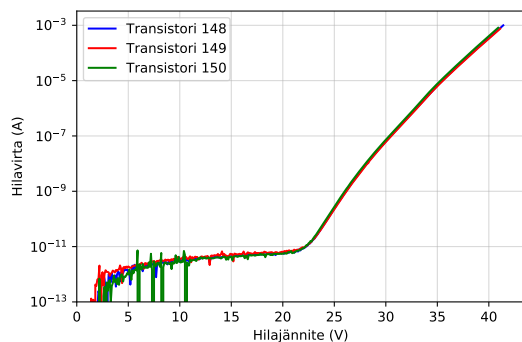
Kuva 29. Transistorin 24 virta-jännitekuvaajat ennen säteilytystä.



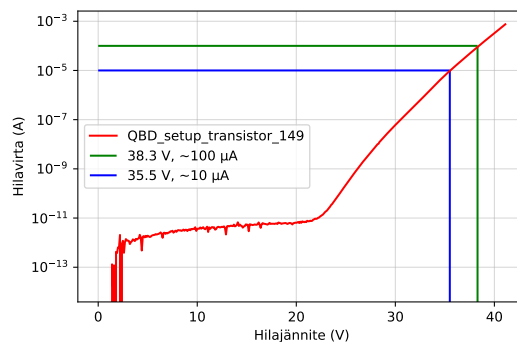
Kuva 30. Keithley mittalaitteiden transistorille antamat jännitteet ja virrat kolmessa eri IV mittaustyyppissä.

4.2 Hilan rasitusjännitteet Q_{BD} -mittausta varten

Rasitusjännitteiden määrittämistä varten tehtiin kolmelle tehotransistorille (merkitty 148, 149 ja 150) $I_G V_G$ -mittaus, jossa hilajännitettä kasvatettiin 100 mV välein transistorien hajoamiseen asti. Nämä $I_G V_G$ -mittaukset ovat esitetty kuvassa 31a. Samassa kuvassa näemme myös Fowler-Nordheim ilmiön, kun hilavirta kasvaa nopeammin noin 22 V hilajännitteen jälkeen. Näiden transistorien välillä ei havaittu merkittäviä eroja, joten vain tehotransistorin 149 $I_G V_G$ on esitetty kuvassa 31b. Mitatut tehotransistorit hajosivat, kun hilajännitteet olivat noin 41,4 V, 41,1 V ja 41,0 V, joten nämä olivat lähtökohtina hilan rasitusjännitteiden valitsemiseen. Halusimme valita rasitusjännitteet niin etteivät transistorit hajoa välittömästi rasituksen alla, mutta toisaalta kuitenkin niin että ne hajoavat järkevissä ajassa. Päätimme valita myöhempiä mittauksia varten hilajännitteiksi 35,5 V ja 38,3 V, koska näillä hilajännitteillä hilavirrat vastaavasti olivat noin 10 μA ja 100 μA .



(a) Transistorien 148, 149 ja 150 $I_G V_G$ mittaukset esitettynä yhdessä kuvaajassa. Kuvassa näkyvässä myös Fowler-Nordheim alue, kun hilavirta kasvaa nopeammin hilajännitteen ylittäessä noin 22 V.



(b) Transistorin 149 $I_G V_G$ -mittaus. Kuvataan merkitty valitut rasitushilajännitteet ja niitä vastaavat hilavirrat.

Kuva 31. Hilan rasitusjännitteiden määrittäminen kolmen transistorin avulla. Hilan rasitusjännitteiksi valittiin 35,5 V (vastaava hilavirta noin 10 μA) ja 38,3 V (noin 100 μA).

4.3 Q_{BD} -mittaukset

Q_{BD} -mittauksessa transistorin hilaoksidin hajotettiin aiemmin luvussa 4.2 valituilla hilan rasisitusjännitteillä 35,5 V ja 38,3 V. Kuvassa 32 on esitettyä kuinka Keithley virtajännitelmittaukset ovat kytketty kiinni transistoriin. Eli toisin sanoen Keithley 2636 antoi tasaisen jännitteen transistorin hilalle ja samalla tarkkaili hilavirtaa. Keithley 2410 taas tarkkaili nielujännitettä ja -virtaa. Kuvassa 33 on esitetty olennaisin kuvaaja tässä mittauksessa eli hilavirta ajan funktiona. Kun tämä I_G integroidaan ajan funktiona, saadaan selville hilaoksidin hajottamiseen vaadittava varauksen määrä eli Q_{BD} . Integrointi suoritettiin SciPy pakettia [42] käyttäen

```
integrate.simps(listGate,listTime),
```

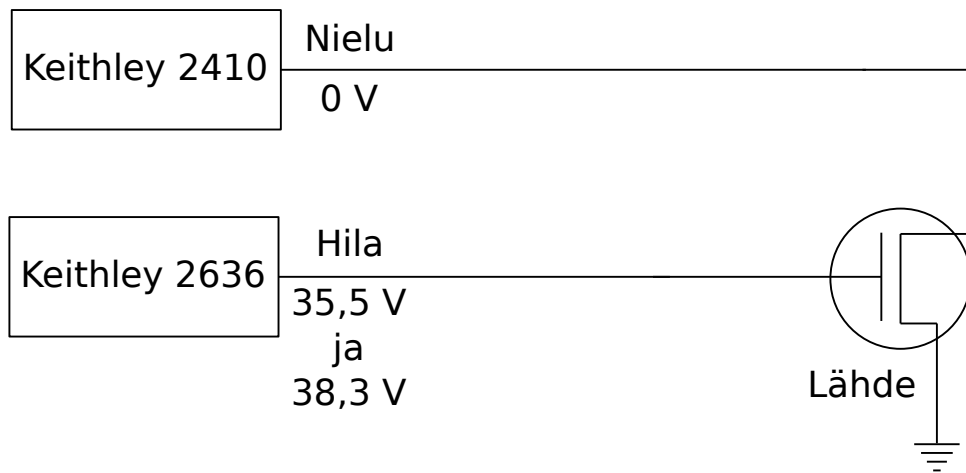
jossa listGate on mitatut hilavirrat ja listTime on näitä vastaavat mittausajat. Eli matemaattisessa muodossa

$$Q_{BD} = \int_0^{t_{BD}} I_G(t) dt, \quad (20)$$

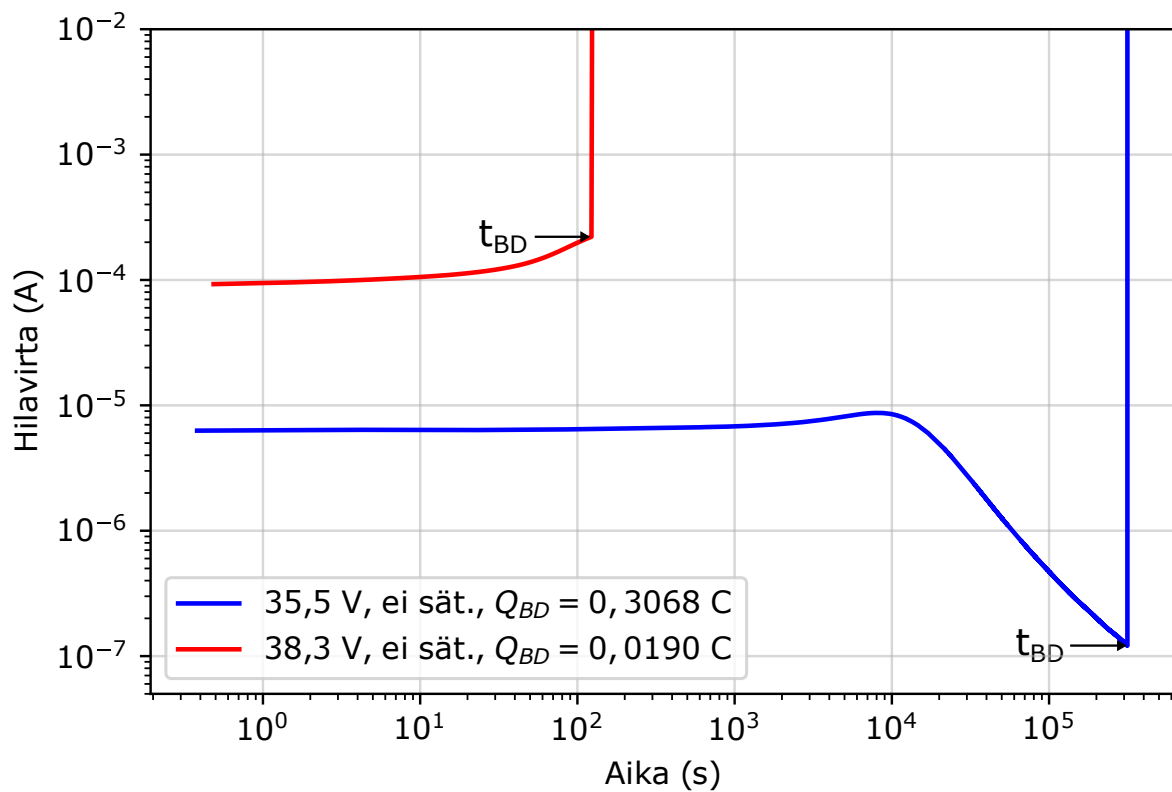
jossa Q_{BD} on kerrytetty varaus ennen transistorin hajoamista, t_{BD} on hajoamisaika ja $I_G(t)$ on hilavirta rasisituksen aikana. Mittaus keskeytettiin, kun transistorin hilavirta oli varmistetusti saavuttanut asetetun 2 mA rajan. Näitä viimeisiä rajan ylittäneitä pisteitä ei otettu huomioon integroinnissa. Kuvasta 33 huomataan myös, että isommalla hilajännitteellä hilavirta on heti alussa yli kertaluokan suurempi kuin pienemmällä hilajännitteellä. Isommalla hilajännitteellä ei ole myöskään samanlaista laskevaa vaihetta kuin pienellä hilajännitteellä. Tähän huomioon palataan vielä luvussa 5.1, jossa lisäämme kuvaan esimerkit säteilyn jälkeisistä virta-aika kuvaajista. Nämä mittaukset suoritettiin viimeisenä kaikille transistoreille ja näiden mittausten avulla pyrittiin selvittämään, onko säteily vaikuttanut transistorien luotettavuuteen tai toimintavarmuuteen.

4.4 Säteilymittaukset

Säteilymittauksen asetelma on kuvailtu jo aiemmin luvussa 3.2.2. Tehotransistorit kiinnitettiin testilevyyn, joka asetettiin elektronisuihkun alle kalibrointipisteeseen. Tällöin transistorit olivat kohdistettu 100 cm etäisyydelle lineaarikiihdyttimen kohteesta (target). Lineaarikiihdyttimen (luku 3.1.5) elektronisuihku on pulssitettua, jossa jakson pituus on 5 ms ja elektroneja tuotetaan 5 μ s (pulsissuhde 0,1%). Elektronien energiaksi valittiin 20 MeV, säteilyannokseksi 100 krad (H_2O) ja säteilynopeudeksi 1000 rad/min (H_2O).



Kuva 32. Keithley mittalaitteiden transistorille antamat jännitteet ja virrat Q_{BD} mittauksissa.



Kuva 33. Esimerkit virta-aika kuvaajista eri hilan rasitusjännitteillä. Transistorin hajoamisaika t_{BD} on pisteessä, jonka jälkeen virta kasvaa yhtäkkisesti yli asetetun katkaisurajan 2 mA. Integroimalla hilavirta hajoamisaikaan t_{BD} asti saadaan laskettua transistorin hajoamiseen vaadittu varaus eli Q_{BD} .

Pulssitettu suihku ei ole kuitenkaan pelkästään elektronisuihkua. Elektronisuihkun lisäksi voi muodostua muutaman MeV verran niin sanottuna foneutroneja [41]. Huoneen

lämpötila mitattiin ennen mittausta ja mittauksen jälkeen eikä siinä huomattu muutosta.

On huomioitava myös, että säteilyannokseksi valittu 100 krad on kalibroitu vedelle (H_2O). Veden törmäyspysäytysvoima (collision stopping power) 20 MeV energialla on noin $2,046 \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$. Piillä vastaava on noin $1,769 \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$, piidioksidilla $1,779 \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$ ja grafiitilla $1,816 \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$ [43]. Lasketaan ensin törmäyspysäytysvoimien suhde transistorin hilassa käytettävälle piidioksidille ja vedelle

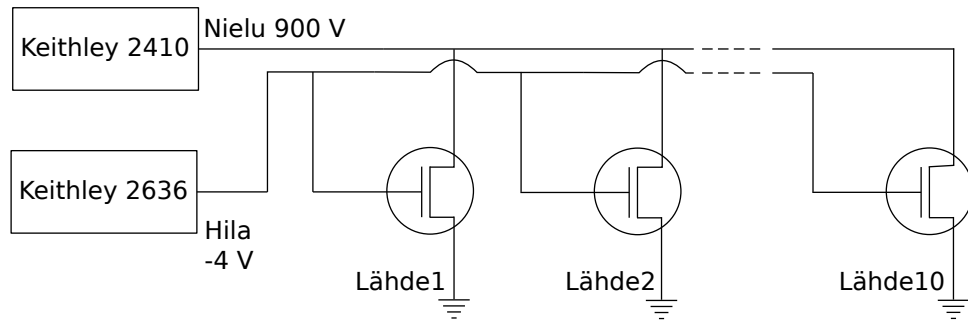
$$\begin{aligned} \frac{\text{piidioksidi}}{\text{vesi (H}_2\text{O)}} &= \frac{1,779}{2,046} = 0,869501\dots \\ &\approx 87,0\%. \end{aligned} \tag{21}$$

Lineaarikiihdyttimen lähteiden [41, 44] ja tehotransistorin kotelon (TO-247-3) paksuuden [36, 45] (paksuuden puoliväli 2,59 mm) perusteella voidaan arvioida, että transistorin saama annos on noin $(97 \pm 1)\%$ säteilytetystä annoksesta (H_2O). Oletetaan nyt että pakkausmateriaalin annosyvyyskäyrä vastaa veden annosyvyyskäyrää. Kerrotaan aiemmin arvioitu säteilyannos $(97 \pm 1)\%$ yhtälössä (21) lasketulla suhteella

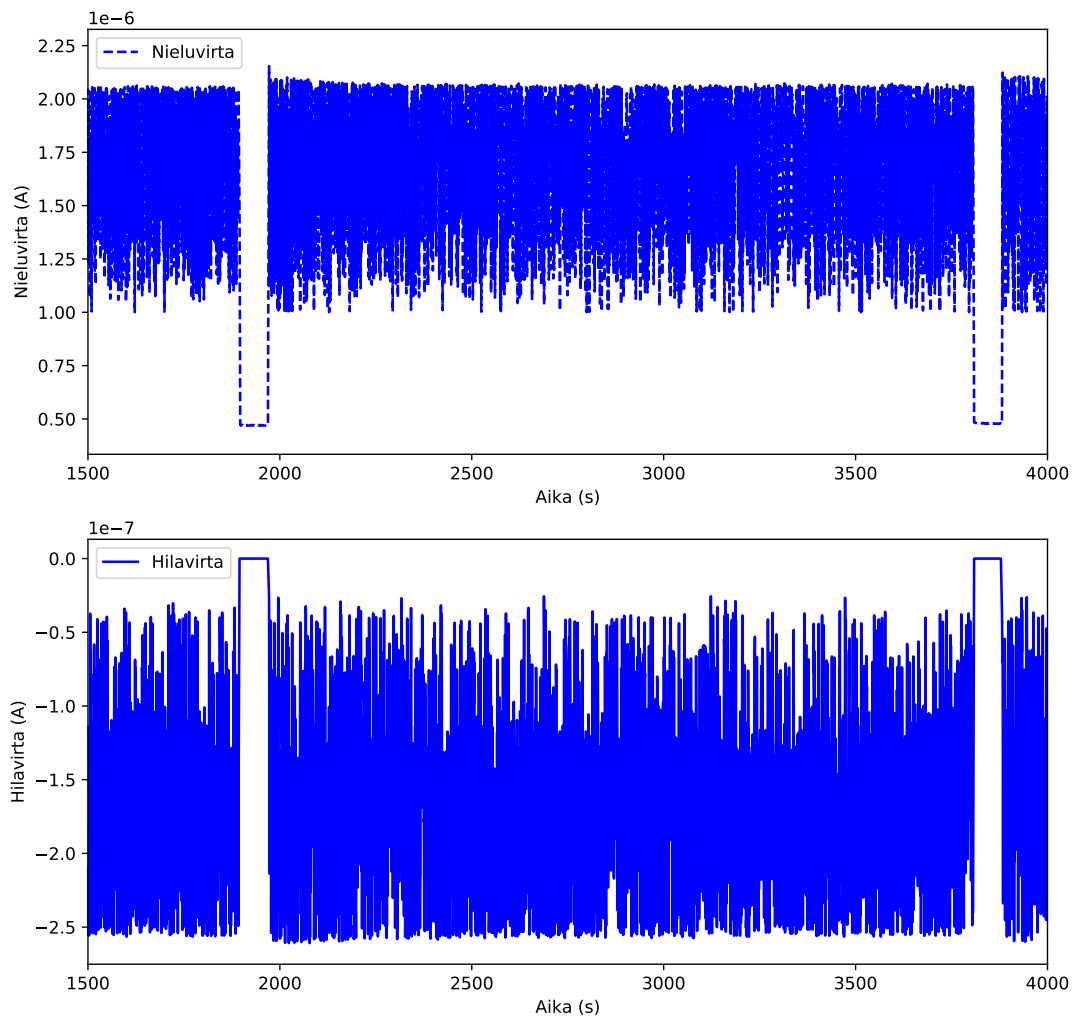
$$\begin{aligned} 97\% \cdot 0,869501\dots &= 84,34164\dots\% \\ &\approx 84\% \end{aligned}$$

ja virheen kanssa $(84 \pm 1)\%$. Tällöin transistorin hilaoksidi saa noin (84 ± 1) krad säteilyannoksen alunperin suunnitellun 100 krad sijaan.

Kuvassa 34 on nähtävissä kuinka transistorit ovat rinnankytkettyinä Keithley mittalaitteiden kanssa. Mittalaitteiden avulla tarkkailtiin transistorien kokonaisvirran ja jännitteen vaihtelua elektronisäteilytyksen aikana. Kuvassa 35 on nähtävissä virtojen muuttuminen säteilyn aiheuttaman ionisaation vuoksi. Jos esimerkiksi kokonaisvirta olisi kasvanut mittauksen aikana, niin tämä voisi tarkoittaa sitä, että jokin transistoreista on hajonnut. Tällöin pitäisi varmistaa, että mikä transistoreista on hajonnut ja ottaa se pois kytkennästä. Tässä tapauksessa yksikään transistoreista ei kuitenkaan hajonnut säteilymittauksien aikana.



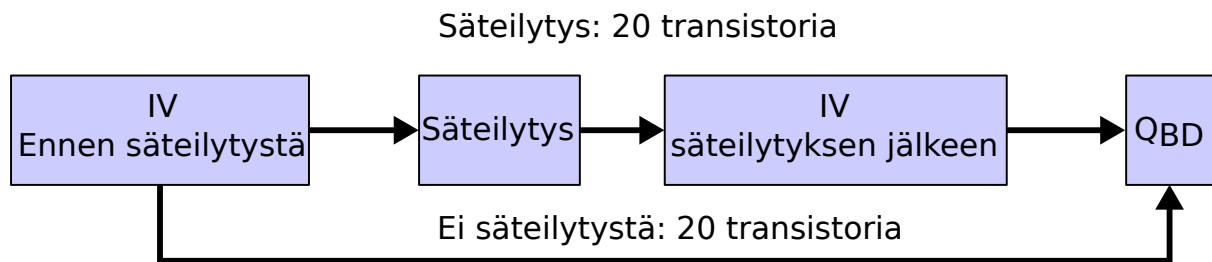
Kuva 34. Keithley mittalaitteiden rinnankytketyille transistoreille antamat jännitteet ja virrat säteilymittauksessa.



Kuva 35. Tilannekuva säteilymittauksen kuvaajasta, jossa on esitetty kokonaisnielu- ja kokonaishilavirta ajan funktiona. Kuvassa on näkyvissä kaksi taukoa säteilytyksessä sekä niiden välissä oleva yksi kokonainen laitteiston antama säteilyannos (noin 30 krad). Säteilyn aikana on nähtävissä ionisaation aiheuttama virta.

4.5 Mittauksien kulku

Mittauksien kulku on havainnollistettu kuvassa 36. Mittaukset aloitettiin tekemällä ensimmäisenä IV-mittaukset. Jos kyseinen transistoriryhmä säteilyttiin, niin toisena tehtiin varmistus ettei elektronisuihku häiritse mittalaitteita eli EMI-mittaus luvun 3.2.2 säteilyhuoneessa. Kolmantena tehtiin varsinainen säteilymittaus transistoreille. Säteilytyksen jälkeen neljäntenä tehtiin uusi IV-mittaus säteilyn vaikutuksen tarkastelemiseksi. Jos transistoriryhmää ei säteilytetty, niin ensimmäisen IV-mittauksen jälkeen voitiin siirtyä suoraan tähän viidenteen askeleeseen eli Q_{BD}-mittauksiin.



Kuva 36. Prosessikaavio mittauksille. Ensin virta- ja jännitemittaukset eli IV-mittaukset. Toiseksi transistoreja säteilytettiin elektronisuihkulla, jonka jälkeen tehtiin heti toinen IV-mittaus. Lopuksi transistorit hajotettiin QBD-mittauksessa eli kerryttämällä transistoreihin varausta niin kauan, että ne hajoavat.

5 Tulokset

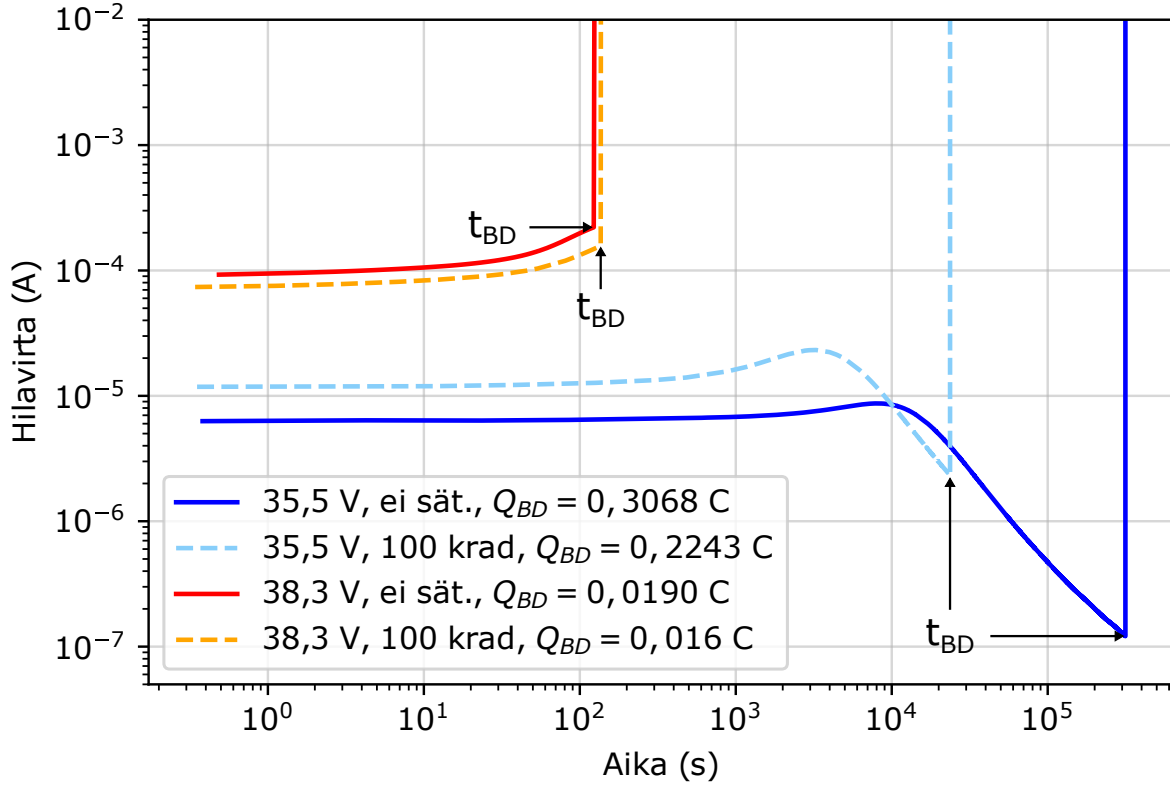
Tässä luvussa käydään läpi työssä tehtyjä mittauksia ja niistä laskettuja tuloksia. Luku on jaettu kahteen osaan, jossa ensimmäisessä tutkitaan elektronisäteilyn vaikutuksia transistorin toimintavarmuuteen ja jälkimmäisessä saman säteilyn vaikutuksia transistorin virta-jännite-käyttäytymiseen. Aloitetaan toimintavarmuudella.

5.1 Säteilyn vaikutus transistorin hajoamiseen

Kuvassa 37 on esitetty esimerkit jokaisen transistoriryhmän virta-aika kuvaajasta. Hilajännitteen ollessa 35,5 V mittaukset olivat pitkiä. Yksittäisen tehotransistorin kohdalla mittaus kesti useamman päivän. Tätä hilajännitettä käyttäessä hilavirta suureni ensimmäisessä vaiheessa ajan myötä ja kerrytti positiivisia varauksia (aukkoja), jotka loukkuuntuvat transistorin hilaoksidiin. Toisessa vaiheessa hilavirta pieneni negatiivisen varauksien (elektronien) loukkuuntumisen määrän kasvaessa dominoivaksi aukkojen loukkuuntumisen sijasta. Kolmannessa vaiheessa elektroneita on loukkuuntunut vaurioituneisiin kohtiin ja lopulta hilavirta kasvaa yhtäkkiä, jolloin transistori hajoaa [21].

Hilavirran ollessa taas 38,3 V transistorien Q_{BD} -mittaukset olivat pääsääntöisesti ohi minuuteissa, kun pienemmällä hilajännitteellä ne olivat päiviä. Tässä tapauksessa transistorit hajosivat jo ensimmäisessä vaiheessa. Tällöin dominoivassa roolissa oli iskuionisaatiovirta (impact ionization current) [21].

Johdetaan seuraavaksi yhtä transistoriryhmää esimerkkinä käyttäen luvussa 2.5.1 esiteltyjä käsitteitä sekä Weibull jakauma. Integroimalla virta-aika kuvaajista I_G ajan suhteen saadaan laskettua Q_{BD} (luku 4.3, yhtälö (20)), joita voidaan sitten käyttää Weibull jakauman laskemisessa. Laajennetaan sitten tarkastelu kaikkiin neljään transistoriryhmään ja analysoidaan käyttäen näiden transistoriryhmien Weibull jakaumaa. Lopuksi verrataan säteilyn vaikutuksia sekä yleisesti että eri hilajänniteparien kesken.



Kuva 37. Esimerkit jokaisen transistoriryhmän virta-aika kuvaajasta. Transistorin hajoamisaika t_{BD} on pisteessä, jonka jälkeen virta kasvaa yhtäkkisesti yli asetetun katkaisurajan 2 mA. Integroimalla hilavirta hajoamisaikaan t_{BD} asti saadaan laskettua transistorin hajoamiseen vaadittu varaus eli Q_{BD} .

5.1.1 Weibull-jakauman johtaminen yhdelle transistoriryhmälle

Säteilyn vaikutusta transistorien toimintavarmuuteen tutkittiin luvun 2.5.1 mukaisella Weibull-jakaumalla. Seurataan esimerkinomaisesti Weibull-jakauman tekeminen transistoriryhmälle, jotka oli säteilytetty ja joita rasiitettiin hilajännitteellä 35,5 V. Taulukkoon 3 on kerätty kyseisellä hilajännitteellä hajotettujen transistorien Q_{BD} , niistä otettu luonnollinen logaritmi $Q_{BD(\ln)}$ sekä yhtälön (2) avulla laskettu mediaanijärjestys.

Esimerkiksi tässä tutkimuksessa kymmenen transistorin ryhmästä viidentenä hajooneen transistorin (järjestysluku = 5) mediaanijärjestykseksi saadaan

$$\begin{aligned}
 (MR)_5 &\approx \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \cdot 100 = \frac{5 - 0,3}{10 + 0,4} \cdot 100 \\
 &\approx 45,1923.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Taulukko 3. Weibull-jakauman piirtämiseen tarvittavia arvoja. Säteiletyt transistorit on hajotettu hilajännitteen ollessa 35,5 V. Taulukossa olevat arvot ovat transistorin hajoamiseen tarvittu varaus Q_{BD} , siitä otettu luonnollinen logaritmi $Q_{BD(\ln)}$ sekä mediaanijärjestys (yhtälö (22)) ja siitä laskettu Y (yhtälö (23)). Mukana myös Poly1dFit, joka on suoransovituksen avulla laskettu y -akselin piste.

Järjestysluku	Q_{BD}	$Q_{BD(\ln)}$	MR	Y	Poly1dFit
1	0,1799	-1,7156	6,7308	-2,6638	-2,3638
2	0,1881	-1,6710	16,3462	-1,7233	-1,9271
3	0,1980	-1,6193	25,9615	-1,2020	-1,4196
4	0,2118	-1,5522	35,5769	-0,8217	-0,7623
5	0,2169	-1,5283	45,1923	-0,5086	-0,5277
6	0,2243	-1,4950	54,8077	-0,2304	-0,2015
7	0,2325	-1,4588	64,4231	0,0329	0,1528
8	0,2327	-1,4581	74,0385	0,2990	0,1600
9	0,2446	-1,4082	83,6538	0,5940	0,6490
10	0,2537	-1,3715	93,2692	0,9927	1,0092

Tälle voidaan laskea vielä yhtälön (3) mukainen arvo

$$Y_5 = \ln(-\ln(1 - F(t))) = \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{(MR)_5}{100}\right)\right) \approx -0,5086, \quad (23)$$

jossa kokeellinen $(MR)_5$ data sijoitetaan Weibullin kertymäfunktioon. Tämä Y_5 toimii y -akselin pisteenä suoransovituksessa. X -akselin pisteenä toimii Q_{BD5} :n arvo, josta on otettu luonnollinen logaritmi. Esimerkkitransistorin Q_{BD5} on 0,2169, jolloin

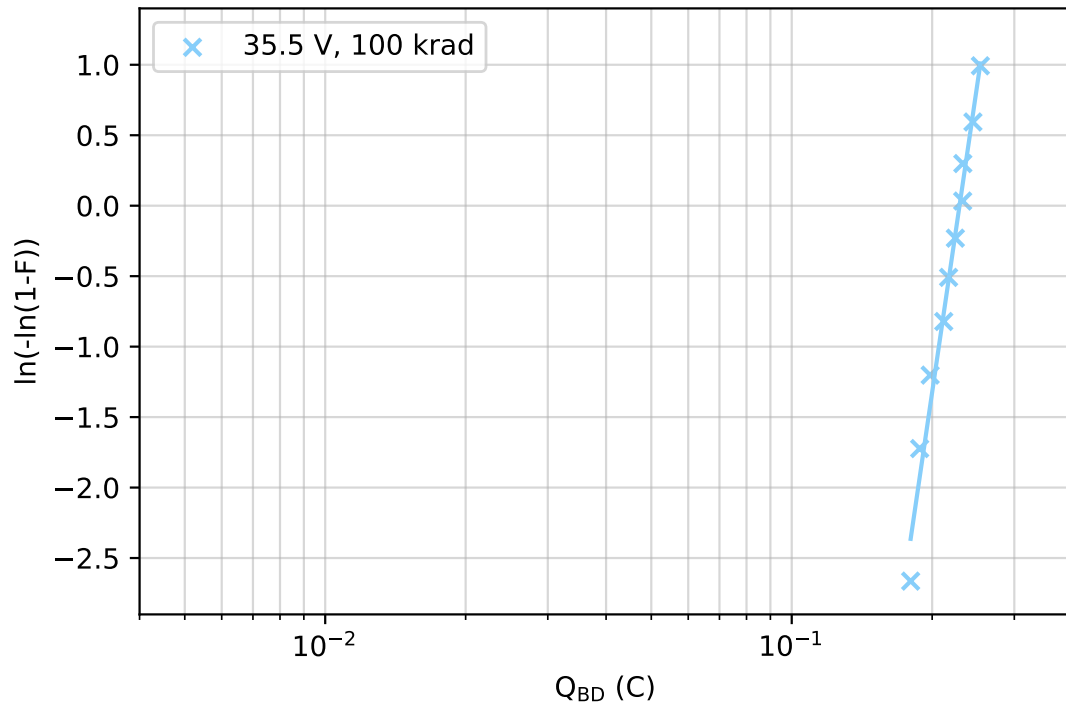
$$\begin{aligned} Q_{BD(\ln)5} &= \ln(Q_{BD5}) = \ln(0,2169\dots) \\ &= -1,5283\dots \end{aligned}$$

Tekemällä pienimmän neliön suoransovitus, kun $x = Q_{BD(\ln)}$ ja $y = Y$ saadaan selville suoransovituksen parametrit a ja b , jotka esiintyivät yhtälössä (6). Python koodina siis seuraavasti käyttäen Numpy:n polyfit funktiota [46]

```
b,a,cov = np.polyfit(QBD_ln,Y,1,cov="unscaled"),
```

jolla saadaan $b = 9,8023\dots \pm 0,4915\dots \approx 9,8 \pm 0,5$ ja $a = 14,4528\dots \pm 0,7527\dots \approx 14,5 \pm 0,8$ sekä cov , joka sisältää kovarianssimatriisin. Kuvassa 38 on nähtävissä esimerkin transistoriryhmälle tehty Weibull jakauma ja suoransovitus. Muiden transistoriryhmien suoransovitusparametrien likiarvot ovat esitetty taulukossa 4.

Aiemmin luvussa 2.5.1 johdettujen yhtälöiden (5) ja (8) mukaan Weibull parametri



Kuva 38. Weibull jakauma säteilytetyille transistoriryhmälle, jota rasitettiin hilajännitteellä 35,5 V.

β ja sen virhe $\delta\beta$ on suoraan suoransovitusparametri b ja sen virhe δb . Toinen Weibull parametri, η , voidaan laskea yhtälön (7) mukaan käyttäen suoransovitusparametrejä a ja b

$$\begin{aligned}\eta &= e^{-a/b} = e^{-a/\beta} \\ &= e^{-14,4528\dots/9,802297\dots} \\ &= 0,228909\dots\end{aligned}$$

Taulukko 4. Suoransovituksen parametrien likiarvot eri mittausasetuksille, jossa σ_{ab} on kovarianssi muuttujien a ja b välillä.

Hilajännite	b	δb	a	δa	σ_{ab}
35,5 V	7,3179	2,3560	8,6742	2,9778	6,9760
Sät. 35,5 V	9,8023	2,9597	14,4528	4,5328	13,3829
38,3 V	1,7575	0,5811	6,2851	2,2733	1,3083
Sät. 38,3 V	1,6449	0,5018	6,5474	2,1800	1,0824

Ja sen virhe $\delta\eta$ yhtälön (9) perusteella

$$\begin{aligned}\delta\eta &= \left\{ \left(-\frac{e^{-a/\beta}}{\beta} \cdot \delta a \right)^2 + \left(\frac{a \cdot e^{-a/\beta}}{\beta^2} \cdot \delta\beta \right)^2 + \left(-\frac{2 \cdot a \cdot e^{(-2a/\beta)}}{\beta^2} \cdot \sigma_{a\beta} \right) \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \left(-\frac{e^{-14,4528\dots/9,802297\dots}}{9,802297\dots} \cdot 4,5328\dots \right)^2 + \right. \\ &\quad + \left(\frac{14,4528\dots \cdot e^{-14,4528\dots/9,802297\dots}}{(9,802297\dots)^2} \cdot 2,959665\dots \right)^2 + \\ &\quad \left. + \left(-\frac{2 \cdot 14,4528\dots \cdot e^{-(2 \cdot 14,4528\dots)/9,802297\dots}}{(9,802297\dots)^3} \cdot 13,3829\dots \right) \right\}^{1/2} \\ &= 0,008255\dots\end{aligned}$$

Näin ollen esimerkkinä toimineen transistoriryhmän (säteilötetty ja hilajännite 35,5 V) Weibull parametrit ovat

$$\begin{aligned}\beta &= (9,802297\dots \pm 2,959665\dots) \approx (10 \pm 3) \\ \eta &= (0,228909\dots \pm 0,008255\dots) \approx (0,229 \pm 0,009).\end{aligned}$$

Q_{BD} :n keskiarvo saadaan taas sijoittamalla juuri lasketut Weibull parametrit yhtälöön (15) sekä muuttamalla ajan T tilalle Q_{BD}

$$\begin{aligned}Q_{BD(\text{keskiarvo})} &= \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \\ &= (0,228909\dots) \cdot \Gamma\left(\frac{1}{9,802297\dots} + 1\right) \\ &= 0,217587\dots\end{aligned}$$

Keskihajonta saadaan taas käyttämällä yhtälöä (18)

$$\begin{aligned}Q_{BD(\text{keskihajonta})} &= \eta \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \\ &= 0,228909\dots \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{9,802297\dots} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{9,802297\dots} + 1\right)^2} \\ &= 0,026676\dots\end{aligned}$$

Ja keskiarvon keskivirhe yhtälön (19) avulla

$$\begin{aligned} Q_{\text{BD(keskivirhe)}} &= \frac{Q_{\text{BD(keskihajonta)}}}{\sqrt{N}} \\ &= \frac{0,026676 \dots}{\sqrt{10}} \\ &= 0,008436 \dots \end{aligned}$$

Näin ollen esimerkkinä käytetyn transistoriryhmän (säteilytetty, hilajännite 35,5 V) hajoamiseen vaadittu varaus oli

$$\begin{aligned} Q_{\text{BD}}(\text{Sät. } 35,5 \text{ V}) &= (0,217587 \dots \pm 0,008436 \dots) \text{ C} \\ &\approx (0,218 \pm 0,009) \text{ C}. \end{aligned}$$

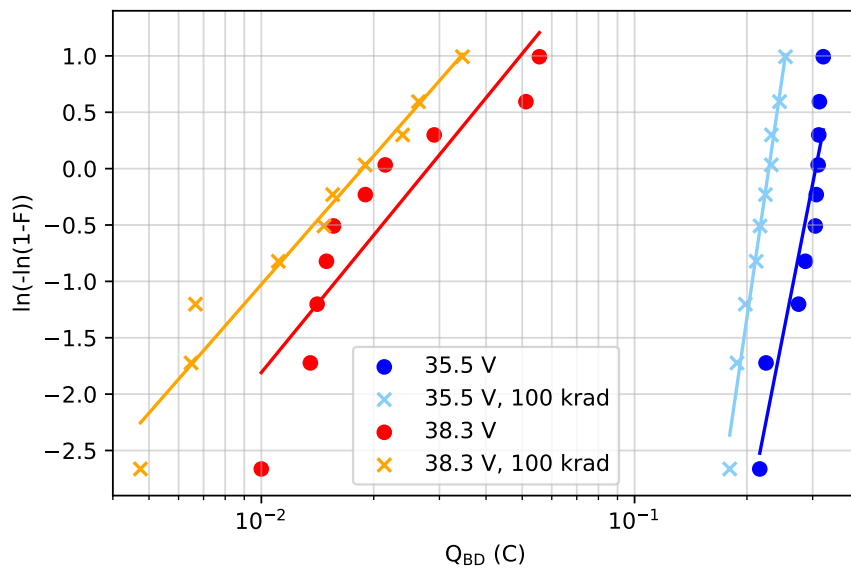
Suoransovituksien parametrit sekä Weibull jakauman parametrit ja $Q_{\text{BD(keskiarvo)}}$ laskettiin samaan tapaan myös muille transistoriryhmille. Näiden lasketut likiarvot ovat esitettyinä taulukoissa 4, 5 ja 6.

Taulukko 5. Weibull parametrien likiarvot eri mittausryhmille.

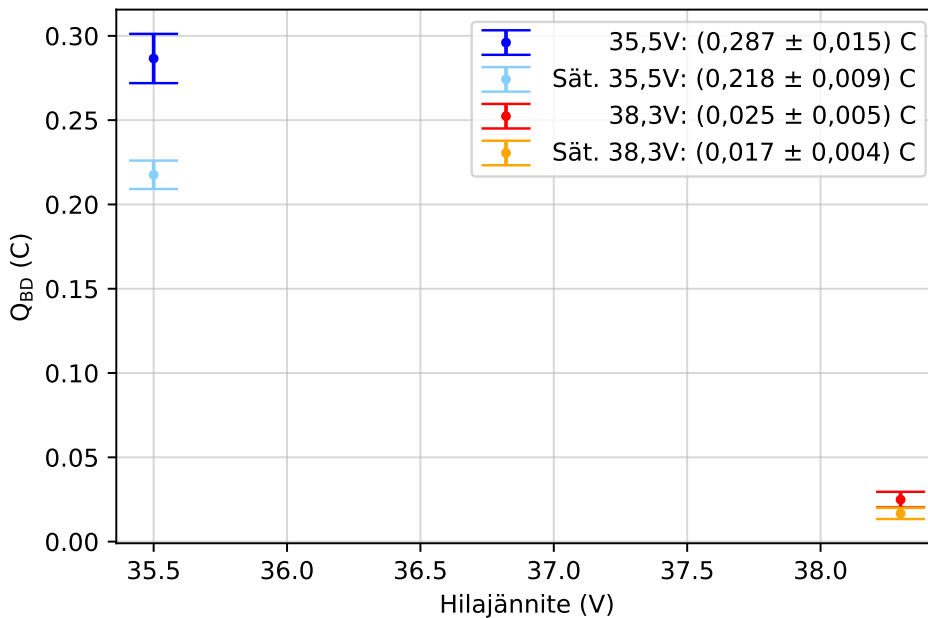
Hilajännite	β	$\delta\beta$	η	$\delta\eta$
35,5 V	7,317940	2,355956	0,305646	0,014964
Sät. 35,5 V	9,802297	2,959665	0,228909	0,008255
38,3 V	1,757463	0,581134	0,027982	0,005739
Sät. 38,3 V	1,644884	0,501798	0,018677	0,004022

5.1.2 Transistoriryhmien säteilyvaikutuksien vertailu eri hilajännitteillä

Kuvassa 39 on esitetty kaikkien transistoriryhmien Weibull jakaumat. Luvun 5.1.1 menetelmiä käyttäen laskettiin Q_{BD} :n keskiarvo, keskihajonta ja keskiarvon keskivirhe kaikille transistoriryhmille ja tulokset ovat esitetty taulukossa 6 ja kuvassa 40. Havaitaan että ei-säteilytettyjen ja säteilytettyjen ryhmien välillä on eroa hajoamiseen vaadittavassa varauksessa.



Kuva 39. Transistorien Weibull-jakaumat hilajännitteillä 35,5 V ja 38,3 V. Kuvassa merkitty palloilla transistorit, joita ei ole säteilytetty ja x-merkeillä ne transistorit, jotka on säteilytetty. Oikealla pienempi hilajännite.



Kuva 40. Q_{BD} keskiarvot keskivirheineen eri transistoriryhmillä.

Taulukko 6. Likiarvot Q_{BD} :n keskiarvolle, keskihajonnalle ja keskiarvon keskivirheelle eri mittausryhmissä.

Hilajännite	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskivirhe
35,5 V	0,286567	0,046202	0,014610
Sät. 35,5 V	0,217587	0,026676	0,008436
38,3 V	0,024915	0,014637	0,004629
Sät. 38,3 V	0,016705	0,010423	0,003296

Hilajännitteen ollessa 35,5 V transistoriryhmien keskiarvot keskivirheineen ovat siis

$$35,5 \text{ V, ei-säteilytetty: } (0,286567 \dots \pm 0,014610 \dots) \text{ C} \approx (0,287 \pm 0,015) \text{ C}$$

$$35,5 \text{ V, säteilytetty: } (0,217587 \dots \pm 0,008436 \dots) \text{ C} \approx (0,218 \pm 0,009) \text{ C},$$

joiden perusteella huomataan että virheet eivät kohtaa, joten hajoamiseen vaadittavassa varauksessa kyseenomaisella hilajännitteellä rasittaessa havaitaan eroa ei-säteilytetyille ja säteilytetyille komponenteille. Hilajännitteen ollessa 38,3 V transistoriryhmien keskiarvot keskivirheineen ovat taas

$$38,3 \text{ V, ei-säteilytetty: } (0,024915 \dots \pm 0,004629 \dots) \text{ C} \approx (0,025 \pm 0,005) \text{ C}$$

$$38,3 \text{ V, säteilytetty: } (0,016705 \dots \pm 0,003296 \dots) \text{ C} \approx (0,017 \pm 0,004) \text{ C}.$$

Tässä tapauksessa transistoriryhmien välinen ero on niin pieni, että niitä on vaikea erottaa toisistaan. Pyöristetyt arvot menevät jopa hieman päällekkäin.

Syitä eroihin ovat ainakin luvussa 2.4.1 esille tulleet säteilyn aiheuttamat vauriot. Säteilytetyt transistoriryhmät hajoavat pienemmällä kertyneellä varauksen määrällä, koska energieettinen elektronisuihku vuorovaikuttaa transistorin hilaoksidin kanssa. Tällöin elektronisuihku aiheuttaa ionisaatiota ja varauksien loukkuuntumista hilaoksidin. Nämä loukkuuntuneet varaukset kumuloituvat ajan kuluessa ja voivat mahdollisesti toimia tunneloitumiskeskuksina, jolloin hilaoksidin läpi kulkeva vuotovirta lisääntyy ja edelleen nopeuttaa transistorin hajoamista.

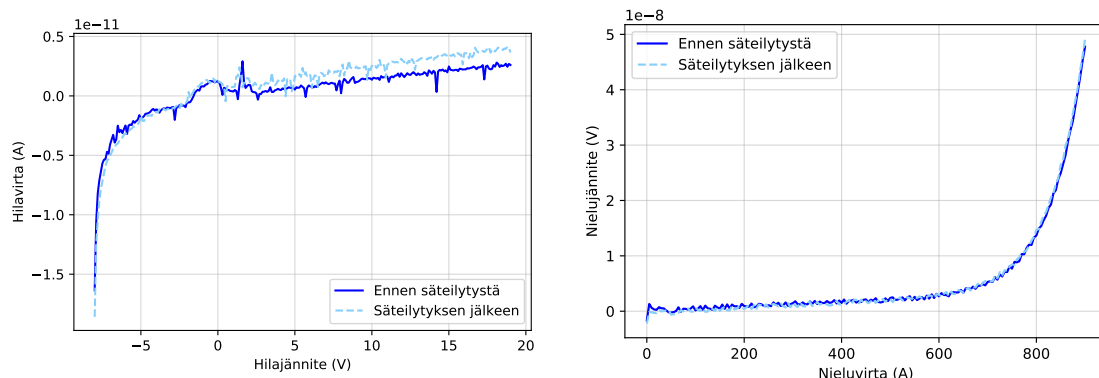
Suuremmalla hilajännitteellä (38,3 V) huomattiin pienempi ero Q_{BD} :ssa. Tämä voi selittyä sillä, että suuremmalla hilajännitteellä rasittaessa sähkökenttä ja iskuionisaatiiovirta oksidissa ovat sen verran suuria, että säteilyn aiheuttaman loukkuuntuneen varauksen osuus vuotovirtaan ja oksidin hajoamiseen on suhteessa pienempi. Siitä syystä kiihdytetty hajoaminen toimintavarmuuden selvittämiseksi tulisi tehdä alhaisemmilla hilajännitteillä myös säteilyn vaikutuksia selvittäessä. Kuten on havaittu myös tutkittaessa vastaavan

menetelmän soveltuvuutta käyttöön arvioinnissa [32, 33].

Lisäksi on syytä huomioida, että transistorikohtaiset erot voivat olla merkittäviä tässä työssä tehdyillä määrillä. Transistoriryhmien sisällä havaittiin välillä suuriakin eroja, joten mitattavien komponenttien määrää tulisi lisätä tarkempien ja luotettavampien tuloksien saamiseksi. Tarkastellaan seuraavaksi säteilyn vaikutuksia transistorin virta-jännite-käyttäytymiseen.

5.2 Säteilyn vaikutus transistorin virta-jännite-käyttäytymiseen

Aloitetaan tutkimalla säteilyn vaikutusta hilavirtaan. Transistori 24:n $I_G V_G$ on esitetty kuvassa 41a, josta huomataan, että hilavirta kasvaa suuremmaksi isoilla hilajännitteillä säteilytyksen jälkeen. Vuotovirta hilaoksidin läpi on siis tosiaankin kasvanut säteilyn vaikutuksesta, kuten luvussa 5.1.2 epäiltiin. Tämä vahvistaa hypoteesia siitä, että hilaoksideihin loukkuuntunut varaus aiheuttaa vuotovirran kasvua, mikä osaltaan voi aiheuttaa toimintavarmuuden alenemista, joka havaittiin edellä. Kuvassa 41b on esitetty saman transistorin $I_D V_D$ kuvaaja, mutta siinä ei nähty muutoksia. Transistorin korkean jännitteen esto-ominaisuus on siis säilynyt. IV-mittauksien välissä oli vain muutama tunti, joiden välissä tehtiin säteilytys.

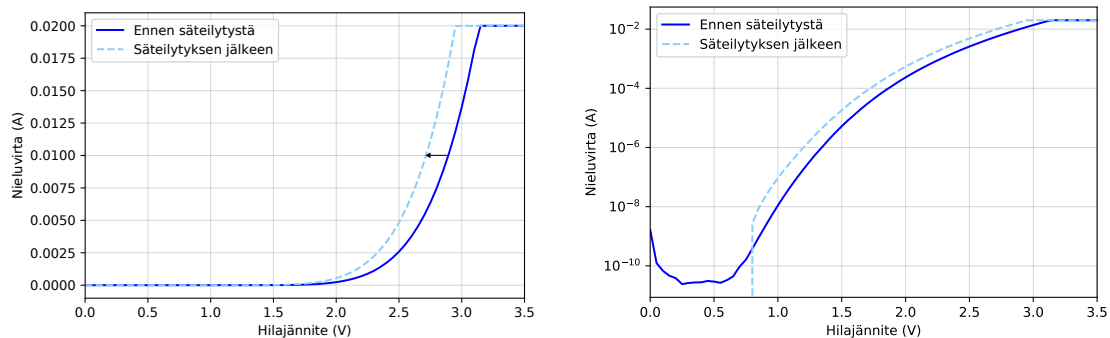


(a) $I_G V_G$ ennen säteilytystä ja sen jälkeen. (b) $I_D V_D$ ennen säteilytystä ja sen jälkeen.

Kuva 41. Transistorin 24 (rasitettu myöhemmin hilajännitteellä 38,3 V) (a) $I_G V_G$ ja (b) $I_D V_D$ kuvaajat. Kuvassa (a) huomataan säteilyn vaikutus, mutta kuvassa (b) ei ole muutoksia.

Tutkitaan seuraavaksi onko säteilyllä ollut vaikutusta transistorin kynnsjännitteeseen. Kynnsjännite on hilajännite, jolla virta pääsee kulkemaan nielulta lähteelle. Tässä työssä kynnsjännite määritettiin hilavirran ollessa 10 mA. Tarkasteltavana on kaksi transistoriryhmää, koska tässä tutkimuksessa säteilytettiin vain kaksi transistoriryhmää. Verrataan näitä ryhmiä $I_D V_G$ mittauksien avulla. Kuvassa 42 on esitetty yhden transisto-

rin $I_D V_G$ skalaarisena ja logaritmisena. Kuvasta nähdään, että transistorin johtamistilaan saattamiseksi tarvittava hilajännite eli kynnyisjännite on pienentynyt. Molempien transistoriryhmien kynnyisjännitteiden keskiarvo, keskihajonta ja keskiarvon keskivirhe on esitetty likiarvoina taulukossa 7. Nämä keskiarvot ja keskivirheet on esitetty kuvassa 43.



(a) Nieluvirta hilajännitteen funktiona eli $I_D V_G$. (b) Nieluvirta hilajännitteen funktiona esitettyinä logaritmisella asteikolla.

Kuva 42. Transistorin $I_D V_G$ esitettynä skalaarisella- ja logaritmisella-asteikolla ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen. Karakterisoinnin aikana nieluajännitteenä käytettiin 20 V. (a) Kynnyisjännitteen muutos merkitty nuolella, kun hilavirta on 10 mA.

Tässä vaiheessa transistoriryhmiä ei ole vielä rasitettu (ei ole tehty Q_{BD} -mittaus-ta), mutta tarkastellaan niitä silti hilajännitteiden perusteella, koska tämä helpottaa säteilyn vaikutuksien erottamista. Hilajännitteen siis ollessa 35,5 V transistoriryhmien kynnyisjännitteiden keskiarvot keskivirheineen ovat

$$35,5 \text{ V, ei-säteilytetty: } (2,5226 \dots \pm 0,0264 \dots) \text{ V} \approx (2,52 \pm 0,03) \text{ V}$$

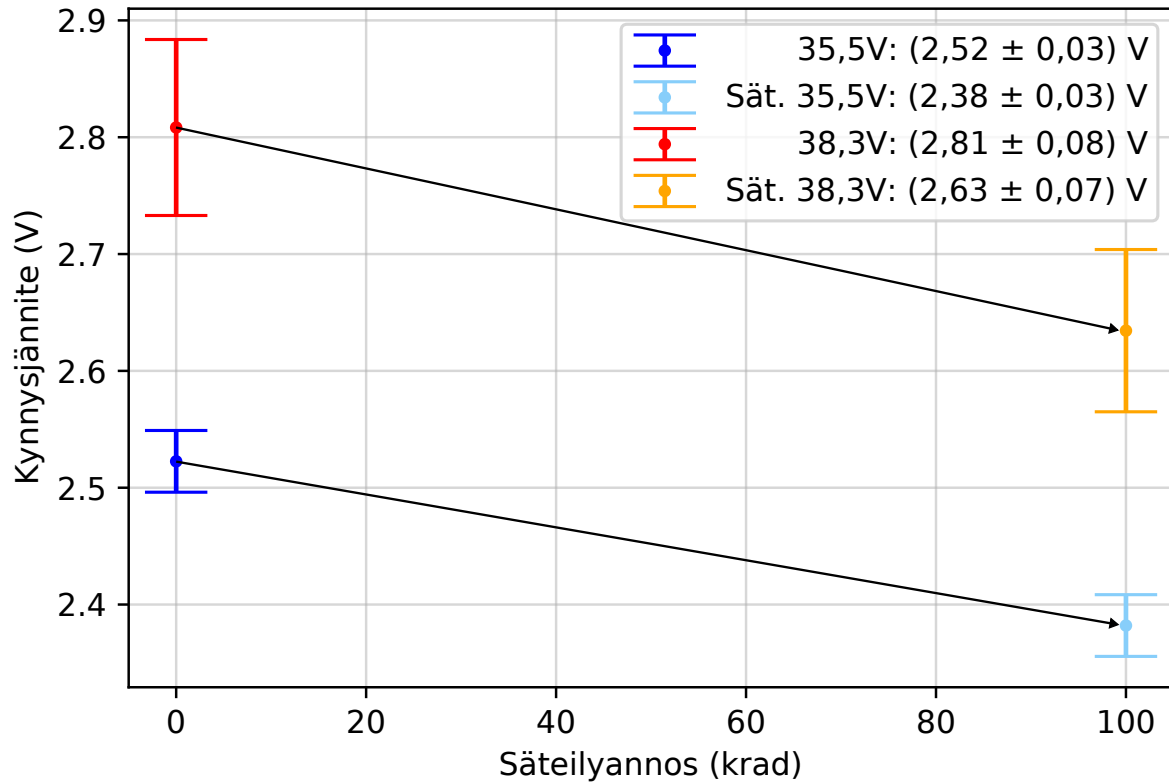
$$35,5 \text{ V, säteilytetty: } (2,3820 \dots \pm 0,0264 \dots) \text{ V} \approx (2,38 \pm 0,03) \text{ V,}$$

joiden perusteella huomataan että virheet eivät ole päällekkäin. Toisessa transistoriryhmässä vastaavat arvot ovat taas

$$38,3 \text{ V, ei-säteilytetty: } (2,8083 \dots \pm 0,0753 \dots) \text{ V} \approx (2,81 \pm 0,08) \text{ V}$$

$$38,3 \text{ V, säteilytetty: } (2,6344 \dots \pm 0,0694 \dots) \text{ V} \approx (2,63 \pm 0,07) \text{ V.}$$

Huomataan että molemmilla säteilytetyillä transistoriryhmillä kynnyisjännitteet ovat muuttuneet selvästi, koska virheet eivät kohtaa. Taulukkoon 8 on koottu vielä kynnyisjän-



Kuva 43. Kynnysjännitteen keskiarvot keskivirheineen kahdelle säteilytetylle transistoriryhmälle, jotka on nimetty niiden hajottamismittauksessa (Q_{BD}) käytetyn rasitusjännitteen mukaan. Nuolilla on havainnollistettu kynnysjännitteen muutos.

nitteiden muutokset, jotka on esitetty myös alla

$$35,5 \text{ V, muutos: } (0,1405 \dots \pm 0,0056 \dots) \text{ V} \approx (0,141 \pm 0,006) \text{ V}$$

$$38,3 \text{ V, muutos: } (0,1739 \dots \pm 0,0085 \dots) \text{ V} \approx (0,174 \pm 0,009) \text{ V}.$$

Säteilyn vaikutus transistorin hilavirtaan (kuva 41a) ja kynnysjännitteeseen (kuva 43) pystyttiin havaitsemaan. Kynnysjännitteen aleneminen johtuu positiivisen varauksen loukkuuntumisesta hilaoksidein, milloin kanavan avaamiseksi tarvitaan vähemmän positiivista jännitettä transistorin hilalle [23].

Taulukko 7. Transistoriryhmien kynnysjännitteiden keskiarvo, keskihajonta ja keskiarvon keskivirhe likiarvoina.

Hilajännite	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskivirhe
35,5 V	2,5226	0,0835	0,0264
Säteilytetty 35,5 V	2,3820	0,0835	0,0264
38,3 V	2,8083	0,2382	0,0753
Säteilytetty 38,3 V	2,6344	0,2196	0,0694

Taulukko 8. Ei-säteilytetyn ja säteilytetyn transistoriryhmän kynnysjännitteen muutokset likiarvoina eri hilajännitteillä.

Hilajännite	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskivirhe
35,5 V	0,1405	0,0178	0,0056
38,3 V	0,1739	0,0270	0,0085

6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin piikarbiditehotransistorien toimintavarmuutta elektronisäteilykentässä. Komponentteja säteilytettiin hajoamiseen asti kahdella eri hilajännitteellä ja jokaiselle komponentille määritettiin hajoamiseen tarvittava varaus eli Q_{BD} . Hilajännitteellä 35,5 V ei-säteilytetyn transistoriryhmän Q_{BD} on noin $(0,287 \pm 0,015)$ C ja säteilytetyn $(0,218 \pm 0,009)$ C. Tällä hilajännitteellä tulokset menevät hieman limittäin. Tuloksen vahvistamiseksi ja virheiden parantamiseksi vaadittaisiin useampia mittauksia samalla hilajännitteellä. Kuitenkin näin pienellä hilajännitteellä mittaaminen on aikaavievää. Varsinkin ei-säteilytettyjen tehotransistorien kohdalla yhden transistorin mittaaminen kesti useamman päivän, joten suurien transistorimäärien mittaaminen ei ole mahdollista tämän laajuisessa työssä tällä mittauskokoopanolla. Tässä tapauksessa transistorit hajosivat elektronien loukkuunnuttua vaurioituneisiin kohtiin ja hilavirran yhtäkkiseen kasvuun [21].

Hilajännitteen taas ollessa 38,3 V ei-säteilytetyn Q_{BD} on $(0,025 \pm 0,005)$ C ja säteilytetyn $(0,017 \pm 0,004)$ C. Tällä suuremmalla hilajännitteellä tulokset menevät enemmän päällekkäin ja niiden erottaminen toisistaan on vaikeaa. Transistorien Q_{BD} -mittauksien pituuksissa puhutaan minuuteista, kun taas pienemmällä hilajännitteellä mittausten pituudet olivat päivissä. Isommalla rasitushilajännitteellä transistorien hajoamisessa dominoivana oli iskuionisaatiovirta [21].

Olisi mielenkiintoista tehdä Q_{BD} -mittauksia eri hilajännitteillä tässä työssä valittujen hilajännitteiden välistä. Tällöin mittaukset olisivat kestoltaan lyhyempiä, mutta hilajännite olisi kuitenkin sellainen, joka ei hajota transistoria minuuteissa. Parempien tulosten saamiseksi transistorien määrää pitäisi myös kasvattaa. Toinen tapa lyhentää mittauksiin menevää aikaa on rakentaa sopiva laitteisto, jonka avulla Q_{BD} -mittaukset voidaan toteuttaa rinnakkain usealle komponentille yhtäaikaa. Nykyisen mittalaitteiston laajentaminen suoraan Keithley mittalaitteita lisäämällä ei ole kuitenkaan kustannustehokasta.

IV-mittauksissa huomattiin säteilyn vaikutus transistorin kynnysjännitteisiin. Ensimmäisellä transistoriryhmällä kynnysjännitteen muutos oli $(0,141 \pm 0,006)$ V ja toisella $(0,174 \pm 0,009)$ V. Pienenä ongelmana virta-jännite mittauksissa oli, että niitä mitattaessa ei oltu huomioitu Keithley 2636 mittalaitteessa vastaan tullutta 20 mA rajoitinta. Mittauksien aikana tämä raja saavutettiin, jolloin transistori ei päässyt kokonaan saturoitumaan eikä

koko mittausaluetta pystytty hyödyntämään. $I_G V_G$ -mittauksessa huomattiin hilavirran kasvaminen säteilytyksen jälkeen. Tämän johtuu todennäköisesti säteilyn aiheuttamista vaurioista hilaoksidiin.

Muita tulevissa tutkimuksissa hyödynnettäviä asioita voisi olla, että mittaa $I_G V_G$ -mittauksen tiettyyn virtarajaan asti. Tällöin voisi nähdä hieman Fowler-Nordheim käyttäytymistä, mutta transistoria ei kuitenkaan rasiteta niin kauan, että se kerkeäisi hajota. Voisi myös tutkia transistorien toimintavarmuutta käyttämällä elektronisuihkun sijaan röntgensuihkua. Tällöin ainakin tässä työssä käytetyllä laitteistolla saman säteilyannoksen saaminen on hieman hitaampaa ja käytetyt hiukkaset vähäenergisiä. Yksihiukkasvaurioiden tapahtuminen olisi epätodennäköisempää vaikka niitä ei näissäkään mittauksissa havaittu.

Lähteet

- [1] Wolfspeed. *Evolution of Silicon Carbide in Power Electronics*. URL: <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/basics-of-sic-evolution-of-sic-in-power-electronics> (viitattu 22.11.2021).
- [2] STUK. *Mitä säteily on?* URL: <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on> (viitattu 22.11.2021).
- [3] STUK. *Radon Suomessa*. URL: <https://www.stuk.fi/aiheet/radon/radon-suomessa> (viitattu 22.11.2021).
- [4] STUK. *Säteilytilanne tänään*. URL: <https://www.stuk.fi/aiheet/sateily-ymparistossa/sateilytilanne-tanaan> (viitattu 22.11.2021).
- [5] R. Pöllänen. ”Radioaktiiviset Aineet, Säteily Ja Ympäristö”. Teoksessa: *Säteily ympäristössä*. 2003. ISBN: 951-712-995-5.
- [6] E. Vartiainen. ”Kosminen säteily”. Teoksessa: *Säteily ympäristössä*. 2003. ISBN: 951-712-995-5.
- [7] S. Duzellier. ”Radiation effects on electronic devices in space”. *Aerospace Science and Technology* 9.1 (2005), s. 93–99. ISSN: 12709638. DOI: 10.1016/j.ast.2004.08.006.
- [8] G. Santin et al. ”Radiation environments: space, avionics, ground and below”. *RADECS 2017, short course* (2003).
- [9] ESA. *Illustration showing Van Allen radiation belts*. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/06/Illustration_showing_Van_Allen_radiation_belts (viitattu 22.11.2021).
- [10] NASA. *Ten Highlights From NASA’s Van Allen Probes Mission*. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/ten-highlights-from-nasa-s-van-allen-probes-mission/> (viitattu 22.11.2021).
- [11] N. Y. Ganushkina et al. ”Locations of boundaries of outer and inner radiation belts as observed by Cluster and Double Star”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 116.9 (2011), s. 1–18. ISSN: 21699402. DOI: 10.1029/2010JA016376.

- [12] ESA. *Earth's plasmasphere and the Van Allen belts*. 2019. URL: <https://sci.esa.int/web/cluster/-/52831-earth-plasmasphere-and-the-van-allen-belts> (viitattu 22.11.2021).
- [13] D. Neamen. *Semiconductors Physics and Devices*. 2003. ISBN: 9780073529585.
- [14] M. Sturge. "Electrons and Holes in Semiconductors". Teoksessa: *Statistical and Thermal Physics*. 2003. Luku Electrons. DOI: 10.1201/9781315275529-19.
- [15] J. Wang. "A Comparison between Si and SiC MOSFETs". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/729/1/012005.
- [16] P. Godignon et al. "SiC power switches evaluation for space applications requirements". *Materials Science Forum* 858 (2016), s. 852–855. ISSN: 16629752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.858.852.
- [17] D. C. Northrop. *Semiconductor Devices — Physics and Technology*. Vol. 23. 1. 1986. ISBN: 0471333727. DOI: 10.1177/002072098602300117.
- [18] J. R. Srour. "Radiation Effects on Microelectronics in Space." (1988). DOI: 10.1109/5.90114.
- [19] R. Singh ja A. R. Hefner. "Reliability of SiC MOS devices". *Solid-State Electronics* 48.10-11 SPEC. ISS. (2004), s. 1717–1720. ISSN: 00381101. DOI: 10.1016/j.sse.2004.05.005.
- [20] C.-T. Yen et al. "Oxide Breakdown Reliability of SiC MOSFET". Teoksessa: 2019, s. 1–3. DOI: 10.1109/WiPDAAsia.2019.8760324.
- [21] Z. Chbili et al. "Modeling Early Breakdown Failures of Gate Oxide in SiC Power MOSFETs". *IEEE Transactions on Electron Devices* 63.9 (2016), s. 3605–3613. DOI: 10.1109/TED.2016.2586483.
- [22] C. Hu. "Chapter 2 - Motion and Recombination of Electrons and Holes". Teoksessa: *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuit*. 2009. Luku 2.
- [23] T. R. Oldham. "Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices". *IEEE Transactions on Nuclear Science* (2003). ISSN: 00189499. DOI: 10.1109/TNS.2013.2259260.
- [24] K. K. Lee, T. Ohshima ja H. Itoh. "Performance of Gamma Irradiated P-Channel 6H-SiC MOSFETs: High Total Dose". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 50.1 (2003), s. 194–200. ISSN: 15581578. DOI: 10.1109/TNS.2002.807853.

- [25] X. Liang et al. "Study of the influence of gamma irradiation on long-term reliability of SiC MOSFET". *Radiation Effects and Defects in Solids* 175.5-6 (2020), s. 559–566. ISSN: 10294953. DOI: 10.1080/10420150.2019.1704757.
- [26] K. Murata et al. "Impacts of gate bias and its variation on gamma-ray irradiation resistance of SiC MOSFETs". *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* 214.4 (2017). ISSN: 18626319. DOI: 10.1002/pssa.201600446.
- [27] D. Soderstrom et al. "Electron-Induced Upsets and Stuck Bits in SDRAMs in the Jovian Environment". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 68.5 (2021), s. 716–723. ISSN: 15581578. DOI: 10.1109/TNS.2021.3068186.
- [28] J. L. Titus. "An updated perspective of single event gate rupture and single event burnout in power MOSFETs". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 60.3 (2013), s. 1912–1928. ISSN: 00189499. DOI: 10.1109/TNS.2013.2252194.
- [29] K. Niskanen et al. "Impact of Electrical Stress and Neutron Irradiation on Reliability of Silicon Carbide Power MOSFET". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 67.7 (2020), s. 1365–1373. ISSN: 15581578. DOI: 10.1109/TNS.2020.2983599.
- [30] C. Martinella et al. "Current Transport Mechanism for Heavy-Ion Degraded SiC MOSFETs". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 66.7 (2019), s. 1702–1709. ISSN: 15581578. DOI: 10.1109/TNS.2019.2907669.
- [31] NASA. *Juno*. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/juno> (viitattu 28.11.2021).
- [32] M. Gurfinkel et al. "Time-Dependent Dielectric Breakdown of 4H-SiC/SiO₂ MOS Capacitors". *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8.4 (2008), s. 635–641. ISSN: 1530-4388. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4700828>.
- [33] K. Matocha et al. "Time-Dependent Dielectric Breakdown of 4H-SiC MOS Capacitors and DMOSFETs". *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8.4 (2008), s. 635–641. ISSN: 15582574. DOI: 10.1109/TDMR.2008.2001182.
- [34] R. B. Abernethy. *The New Weibull Handbook*. 1996. ISBN: 0965306216.
- [35] J. R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2. painos. 1997. ISBN: 0-935702-75-X.
- [36] CREE. "C3M0015065D Silicon Carbide Power MOSFET". 1 (2017), s. 1–10. URL: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/C3M0280090D.pdf>.

- [37] Keithley. "2400 SourceMeter SMU Instruments" (2013). URL: http://www.farnell.com/datasheets/2238744.pdf?_ga=2.15412083.450713776.1499842582-1530823304.1499842582.
- [38] Keithley. "Series 2600A System SourceMeter Instruments Series 2600A System SourceMeter Instruments" (). URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1950178.pdf>.
- [39] Arduino. *Arduino Uno*. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (viitattu 23. 11. 2021).
- [40] Arduino. *Arduino Uno pins*. 2020. URL: https://content.arduino.cc/assets/Pinout-UN0rev3_latest.pdf (viitattu 23. 11. 2021).
- [41] H. Kettunen. *Varian Clinac linear accelerator*. URL: <https://www.jyu.fi/science/en/physics/research/infrastructures/accelerator-laboratory/radiation-effects-facility/linear-electron-accelerator> (viitattu 23. 11. 2021).
- [42] SciPy. *SciPy Integration*. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/integrate.html?highlight=scipy%20integrate%20sims> (viitattu 23. 11. 2021).
- [43] NIST. *ESTAR stopping power and range tables for electrons*. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (viitattu 23. 11. 2021).
- [44] RADEF. *Electron depth dose distribution in water*. URL: <https://www.jyu.fi/science/en/physics/research/infrastructures/accelerator-laboratory/radiation-effects-facility/pictures/electrons-in-water.pdf> (viitattu 23. 11. 2021).
- [45] T. Basler et al. *TO-247-3 Advanced Isolation*. 2019. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TO-247-3_Advanced_Isolation_ApplicationNotes-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4625fe367840160021aeb971416 (viitattu 23. 11. 2021).
- [46] Numpy. *numpy.polyfit*. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.polyfit.html> (viitattu 23. 11. 2021).