

20 MeV elektronisäteilyn vaikutus piikarbiditehotransistoreihin

Pro gradu -tutkielma

Tekijä:
Jaakko Tuominen

Ohjaaja:
Arto Javanainen

13. maaliskuuta 2018

Fysiikan laitos
Jyväskylän yliopisto

Tiivistelmä

Tuominen, Jaakko

20 MeV elektronisäteilyn vaikutus piikarbiditehotransistoreihin

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2018, 57 sivua (liit. 2 sivua)

Piikarbidi (SiC) on verrattain uusi puolijohdemateriaali, josta voidaan valmistaa kestäviä tehotransistoreja. Piikarbiditehotransistorien säteilynkestoa ei ole vielä kattavasti tutkittu, mutta raskasionitesteissä ne ovat osoittautuneet yllättävän herkiksi vaurioitumaan.

Tässä opinnäytetyössä tutkin kahden eri piikarbidipohjaisen tehotransistorin säteilynkestävyyttä 20 MeV elektroneilla säteilyannoksen ollessa $1000 \text{ rad}(\text{H}_2\text{O})/\text{min}$. Tutkimuksessa selvitetään, kuinka voimakkaassa säteilyssä transistorit pysyvät vielä toimintakuntoisena ja miten transistorin kynnyksjännite muuttuu säteilytyksessä.

Kaikki tutkitut transistorit säilyivät toimintakuntoisena testausolosuhteissa. Wolfspeed'in C2M0080120D 1200-V SiC tehotransistorin kynnyksjännite muuttui säteilytettäessä $(-2,0 \pm 0,2) \text{ mV/krad}$ ja saman valmistajan C2M1000170D 1700-V SiC tehotransistorin kynnyksjännitteen muutos oli $(-1,33 \pm 0,06) \text{ mV/krad}$. Kynnyksjännitteiden muutos voidaan selittää säteilytyksessä hilaoksidein kertyneen varauksen avulla. Sen sijaan kynnyksjännitteen lämpötilariippuvuus ei muuttunut säteilytyksen vaikutuksesta. Lisäksi tässä opinnäytetyössä tehdään lyhyt katsaus maapallon ja avaruuden säteily-ympäristöön sekä esitellään, missä energettisiä elektroneita esiintyy luonnostaan.

Avainsanat: piikarbidi (SiC), tehotransistori, N-tyypin transistori, elektronisäteily, Varian Clinac lineaarikiihdytin, kynnyksjännite

Abstract

Tuominen, Jaakko

Effects of 20 MeV electron irradiation to silicon carbide power MOSFETs

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2018, 57 pages (app. 2 pages)

Silicon carbide (SiC) is a relatively new semiconductor material which can be used to produce durable power devices. Their irradiation durability has not yet been extensively studied but they have been surprisingly sensitive to damage in heavy ion tests.

In this thesis I investigate the irradiation durability of two different silicon carbide power MOSFETs with 20 MeV electron irradiation and dose rate of 1000 rad(H₂O)/min. The study shows how well MOSFETs remain in operation in intense electron irradiation and how the threshold voltage of MOSFETs changes during irradiation.

All investigated MOSFETs remained operational under test conditions. The threshold voltage of the Wolfspeed C2M0080120D 1200-V SiC power MOSFET changed (-2.0 ± 0.2) mV/krad during irradiation. The threshold voltage change of the same manufacture's C2M1000170D 1700-V SiC power MOSFET was (-1.33 ± 0.06) mV/krad. The change in the threshold voltages can be explained by the charge accumulated in the gate oxide during irradiation. The temperature dependency of the threshold voltage did not change due to irradiation. In addition this thesis provides a brief overview to the radiation environment on Earth and in space and presents where high energy electrons occur naturally.

Keywords: silicon carbide (SiC), power MOSFET, n-type MOSFET, electron radiation, Varian Clinac linear accelerator, threshold voltage

Sisältö

1	Johdanto	9
1.1	Säteily-ympäristö maapallolla	9
1.2	Avaruuden säteily-ympäristö	10
1.2.1	Van Allenin vyöhykkeet	11
1.2.2	Kosmiset hiukkaset ja säteily ulkoavaruudessa	11
1.2.3	Suojautuminen avaruuden säteilyltä	14
2	Teoreettiset lähtökohdat	15
2.1	Käsitteet	15
2.2	Energiavyömalli	15
2.3	Puolijohteet	16
2.4	Tehotransistorit	17
2.4.1	Piikarbidi	17
2.4.2	Metalli-oksidi-puolijohde MOS	18
2.4.3	Transistorin nieluvirran yhtälö	21
2.4.4	Transistorin kynnysjännite	22
2.4.5	Transistorin vuotovirta	22
2.4.6	Transistorin lämmittäminen	23
2.4.7	Transistorin säteilyvaste	24
2.4.8	Hilaoksiidiin vangitun varauksen muutoksen laskeminen	26
2.4.9	Kynnysjännitteen muutoksen analysoiminen graafisesti	27
2.5	Energeettisten elektronien energia ja transistorin säteilyannos	28
3	Mittausasetelma	29
3.1	Tutkittavat komponentit ja mittausvälineet	29
3.1.1	Keithley 2410 ja Keithley 2636	29
3.1.2	Keithley 2290-PM-200 ylijännitesuoja	29
3.1.3	Testilevy	30
3.1.4	Lineaarikiihdytin	30
3.1.5	Weisstechnik lämpökaappi	32
3.2	Mittalaitteiden ohjaaminen	32
3.3	Mittausasetelma säteilytyksen vaikutuksen mittaamiseen	32
3.4	Mittausasetelma lämpötilan vaikutuksen mittaamiseen	33
4	Mittaukset	35
4.1	Ensimmäinen säteilytysmittaus	35
4.2	Alustava lämpötilamittaus	35
4.3	Toinen säteilytysmittaus	37
4.4	Säteilytyksen jälkeinen lämpötilamittaus	37

4.5	Säteilytyksen pitkäaikaiset vaikutukset	38
5	Tulokset	41
5.1	Säteilytyksen vaikutus C2M1000170D-mallin piikarbiditransistoriin .	41
5.2	Säteilytyksen vaikutus C2M0080120D mallin piikarbiditransistoriin .	45
6	Johtopäätökset	51
	Kirjallisuutta	53
A	Kuvat mittausasetelmista	59

1 Johdanto

Erilaiset elektroniset laitteet ovat nykyaikaisen yhteiskuntamme perusta sellaisenaan, kuin me sen tunnemme. Enää on vaikea löytää sellaista laitetta, jonka toimintaan ei liittyisi jokin elektroninen virtapiiri. Laitteiden ja koko yhteiskunnan sujuvan toiminnan kannalta on tärkeää, että elektroniset laitteet toimivat niin kuin ne on suunniteltu. Siksi myös elektroniikkapiirien toimintaa ja käyttöikää on tutkittu tarkasti, ja niille osataan asettaa tarkat toimintarajat.

Ulkoiset tekijät voivat vaikuttaa radikaalisti elektronisten komponenttien toimintaan. Esimerkiksi suuret lämpötilan vaihtelut, mekaaninen rasitus tai ionisoiva säteily voivat heikentää tai muuttaa elektroniikkakomponentin toimintaa, tai jopa rikkoa sen täysin. Siksi on tärkeää tutkia myös näiden muuttujien vaikutusta käytössämme oleviin sähköisiin laitteisiin.

Ionisoiva säteily aiheuttaa elektroniikkakomponentin puolijohde- sekä eristemateriaaleissa ylimääräisiä vapaita varauksenkuljettajia, jotka voivat muuttaa komponentin toimintaa. Koska ionisoiva säteily on vaarallista myös ihmisen terveydelle, ei jokapäiväisessä elinympäristössämme ole juurikaan voimakkaita ionisoivan säteilyn lähteitä. On olemassa kuitenkin tilanteita, joissa elektroniikkaa joudutaan käyttämään ympäristössä, jossa ne altistuvat ionisoivalle säteilylle. Tällaisia ympäristöjä löytyy esimerkiksi avaruudesta, ydinvoimaloista ja kiihdytinlaboratorioista.

Tavaran lähettäminen avaruuteen on kallista. Siksi on tärkeää, että sinne lähetetyt laitteet toimivat mahdollisimman pitkään ja luotettavasti. Kiihdytinlaboratoriossa laitteiden komponentit voidaan altistaa lyhyessä ajassa sellaiselle säteilyannokselle, jonka ne tulisivat saamaan pitkän avaruustehtävän aikana. Tällä tavoin voidaan selvittää kuinka hyvin tutkitut komponentit soveltuvat käytettäväksi esimerkiksi satelliiteissa.

Piikarbidista valmistettujen puolijohdekomponenttien soveltuvuutta avaruudessa käytettäväksi on tutkittu kiihdytinlaboratorioissa raskasioneitörmäyksillä [2, 34, 48]. Näissä kokeissa piikarbidipuolijohdekomponentit ovat olleet yllättävän herkkiä vaurioitumaan. Siksi tässä opinnäytetyössä tutkittiin energettisten elektronien törmäysten vaikutusta piikarbidista valmistettuihin tehotransistoreihin.

Kaikki tutkitut transistorit säilyivät toimintakuntoisina mittausten ajan. Transistoreita säteilytettiin 20 MeV elektroneilla. Mittauksissa havaittiin kuitenkin, että transistorien kynnysjännite pienentyi. Myös tähän ilmiöön perehdytään tässä opinnäytetyössä.

1.1 Säteily-ympäristö maapallolla

Radioaktiivista säteilyä on maailmankaikkeudessa kaikkialla. Maapallolla sitä esiintyy muun muassa banaaneissa, maaperässä ja betonissa, jossa on aina pieniä määriä

radioaktiivisia aineita, kuten kaliumia, toriumia ja uraania. Pieniä määriä radioaktiivisia aineita saatetaan käyttää myös vaikkapa suurtehovalaisimissa, pimeässä hohtavissa aineissa tai palohälyttimissä [40]. Tätä luonnollisesti ympäristössämme olevaa radioaktiivista säteilyä kutsutaan taustasäteilyksi.

Taustasäteilyn voimakkuus voi vaihdella ympäristön mukaan jopa satakertaisesti [44]. Säteilyturvakeskuksen mukaan Suomessa luonnon taustasäteilyn voimakkuus on $0,04\text{--}0,30\ \mu\text{S/h}$ tai karkeasti $0,07\text{--}0,5\ \text{rad/min}$ [41]. Tämä aiheuttaa vuodessa keskimäärin vajaan $1\ \text{mS}$ säteilyannoksen. Taustasäteilyn energia tai intensiteetti on kuitenkin niin matala, ettei se aiheuta haittaa sähkölaitteille.

Maapallolta löytyy myös voimakkaampia säteilylähteitä esimerkiksi ydinvoimaloista ja fysiikan tutkimuslaboratorioista. Näissä laitoksissa säteilyn voimakkuus ja vaikutusalue ovat tarkasti tiedossa, joten säteily ei aiheuta haittaa sähkölaitteille ellei niitä tarkoituksella altisteta säteilylle.

Avaruuden haitallisesta säteilystä maapallon pinnalle pääsee vain hieman ultraviolettisäteilyä ja muuta säteilyä, kuten kosmisia hiukkasia ja yläilmakehässä kosmisten hiukkasten reaktioissa vapautuvia hiukkasia [51]. Tästä saamme kiittää maapallon magneettikenttää ja kaasukehää. Kuitenkin kosmisen säteilyn synnyttämät maanpinnalle yltävät neutronit ovat riittävän energettisiä aiheuttaakseen vaurioita mm. tehotransistoreissa [2]. Haitallisen säteilyn määrä lisääntyy noustessa ilmakehässä korkeammalle. Tämä on huomioitava esimerkiksi lentoliikenteessä.

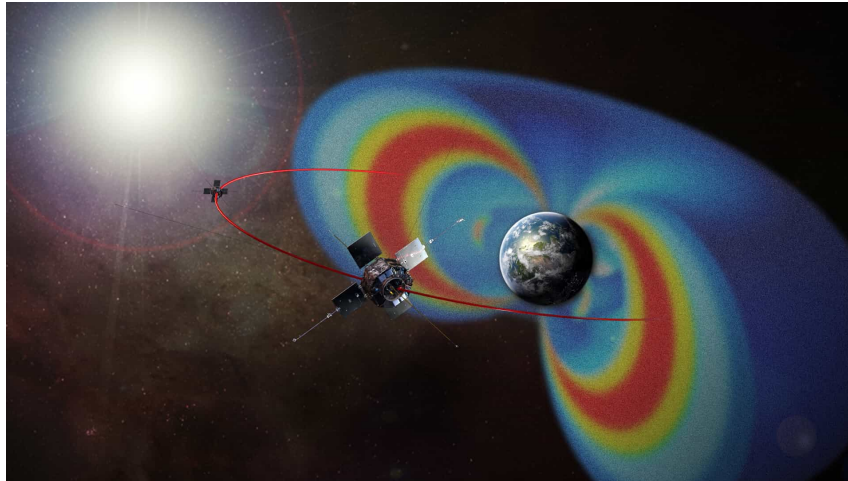
Maan pinnalla vakavimman uhan sähkölaitteille aiheuttavat auringosta peräisen olevat korkean energian hiukkas- ja säteilypurkaukset, joita aiheuttavat aurinkorohut (solar flare) ja koronapurkaukset (Coronal Mass Ejection, CME). Ilmiöiden synnyttämät varatut hiukkaset vuorovaikuttavat maapallon magneettikentän kanssa, mikä voi indusoida virtapiikkejä sähköverkkoihin. Tällöin verkossa kiinni olevat sähkölaitteet ovat vaarassa vaurioitua. Näin tapahtui esimerkiksi vuonna 1859, kun voimakkain tunnettu aurinkomyrsky osui maahan. Tapahtuma aiheutti revontulia aina päiväntasaajalla saakka ja vaurioitti vakavasti silloisia lennätinlinjoja [31].

1.2 Avaruuden säteily-ympäristö

Avaruudessa ionisoivaa säteilyä on runsaasti. Säteily koostuu Auringosta peräisin olevasta säteilystä ja aurinkokunnan ulkopuolelta tulevasta kosmisesta säteilystä (Galactic Cosmic Radiation, GCR). Lisäksi varautuneet hiukkaset voivat jäädä vangituksi maan magneettikenttään. Tällaisella alueella maan magneettikentässä säteilyn intensiteetti voi kasvaa huomattavasti [3].

Aurinkotuuli on plasmaa, joka täyttää auringon ja planeettojen välisen avaruuden. Sitä syntyy kun auringon säteilypainetta puhaltaa koronan uloimmat osat ympäröivään avaruuteen. Aurinkotuuli koostuu protoneista, alfahiukkasista ja pienestä määrästä muita varattuja hiukkasia sekä elektroneista siten, että plasma on sähköisesti varauksetonta [18]. Aurinkotuulen elektronien energia vaihtelee $0,01\text{--}10\ \text{keV}$ välillä [45].

Auringossa syntyy aurinkorohujen ja koronapurkausten seurauksena myös korkean energian hiukkasia (Solar Energetic Particles, SEP). Ne koostuvat pääosin protoneista, alfahiukkasista ja elektroneista. Protonien energia vaihtelee $0,8\ \text{MeV}$:stä yli



Kuva 1.1: Taitelijan näkemys NASA:n Van Allenin vyöhykkeitä kartoittaneesta avaruuslennosta.

400 MeV:in, alfahiukkasten energia 1,4 MeV:stä 80 MeV:in ja elektronien energia 0,02 MeV:stä 20 MeV:in [21].

1.2.1 Van Allenin vyöhykkeet

Maapallon magneettikenttä vangitsee hiukkasia alueille, joita kutsutaan Van Allenin vyöhykkeiksi. Maapallon ympärillä on kaksi pysyvää Van Allenin vyöhykettä, jotka mitattiin ensimmäisen kerran vuonna 1958 [3]. Viimeksi NASA lähetti luotaimen tutkimaan näitä vyöhykkeitä vuonna 2012, jolloin paljastui myös tilapäinen kolmas Van Allenin vyöhyke [5].

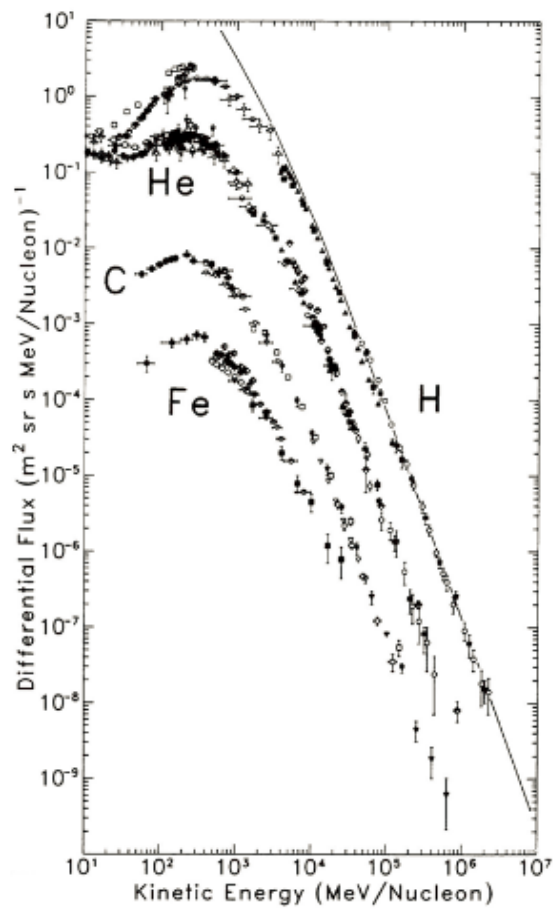
Sisempi Van Allenin vyöhyke käsittää maan magneettikentän L-kuoret 1–2 [42]. Siellä on mitattu olevan 2–6 MeV elektroneja, joiden määrä vaihtelee ajan kuluessa [42]. Lisäksi sisemmällä vyöhykkeellä on korkean energian protoneita, joiden energiaksi on mitattu 0,1–400 MeV. [14].

Ulompi Van Allenin vyöhyke käsittää maan magneettikentän L-kuoret 3–6 [42]. Ulommalla kuorella on pääasiassa elektroneja, joiden energiaksi on mitattu 2–17 MeV [42].

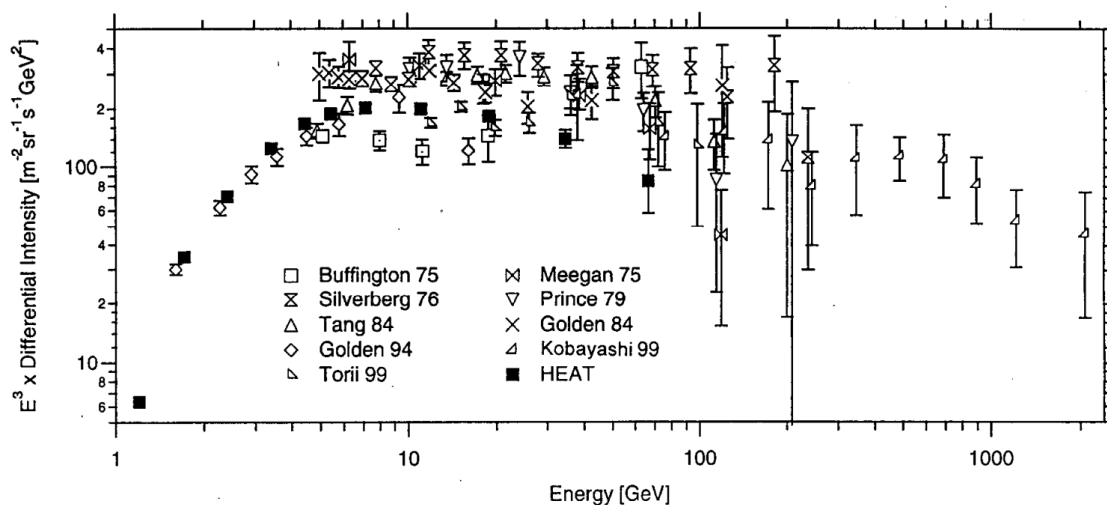
Vastaavanlaisia säteilyvyöhykkeitä on myös muiden aurinkokunnan planeettojen ja kuiden ympärillä. Voyager 2 luotain todisti tämän Jupiterin ja Uranuksen kohdalla [30, 46]. Jupiterin magneettikentässä on havaittu elektroneja, joiden energia on melkein 100 MeV [42].

1.2.2 Kosmiset hiukkaset ja säteily ulkoavaruudessa

Kosmisesta säteilystä 99 % on alkuaineiden ytimiä, joista 90 % on protoneja, 9 % alfahiukkasia ja loput raskaampia hiukkasia. Yksi prosentti kosmisesta säteilystä koostuu energettisistä elektroneista [9]. Kuvaajassa 1.2 on J. A. Simpson [37] esittelemät mittaustulokset neljän eri kosmisen alkuaineen intensiteeteistä energian funktiona.



Kuva 1.2: Neljän eri kosmisen säteilyn ionin intensiteetit energian funktiona. Ionien keskimääräinen energia on noin yhden GeV suuruusluokkaa. Kuva J. A. Simpson [37].



Kuva 1.3: Vuodesta 1975 asti suoritetuista mittauksista yhdistetty kosmisten elektronien spektri. Kuva D. Müller [24].

Kosmisten hiukkasten energian spektri on valtava johtuen niiden kirjavasta syntyperästä. Energeettisintä havaittua kosmista hiukkasta kutsutaan Voi Jumalauta! -hiukkaseksi (engl. Oh-My-God particle), jonka energian arvioitiin olevan $3 \cdot 10^{20}$ eV [16]. Kosmisten ionien keskimääräinen energia on yhden GeV suuruusluokkaa [37]. Kosmisen gammasäteilyn energiaksi on parhaimmillaan mitattu jopa $1 \cdot 10^{15}$ eV [29].

Kosmisten elektronien energiaspektrin määrittäminen on hankalaa, sillä niitä on vähän suhteessa kosmisiin protoneihin [24]. Eri mittauksista kerätyn datan perusteella kosmisten elektronien energia vaihtelee 1 GeV:stä 1 TeV:in, kuten Dietrich Müllerin artikkelissa esitetystä kuvaajasta 1.3 voi nähdä [24]. Kosmisten positronien energiaksi on mitattu 10 GeV–200 GeV [1].

Kosmisen säteilyn vuo on suhteellisen pieni, vain noin 100 hiukkasta/cm² päivässä. Se voi kuitenkin aiheuttaa erityisesti herkille komponenteille häiriötä päivittäin [33]. Siksi kosminen säteily on myös merkittävä ongelma, kun suunnitellaan planeettojen välisiä avaruustehtäviä [26]. Vuonna 2010 Voyager 2 satelliitti kärsi toimintahäiriöstä, joka johtui yksittäisen hiukkasen aiheuttamasta muistivirheestä [28]. Ongelman saattoi aiheuttaa kosmisen säteilyn hiukkanen.

Yleisesti tällaisia yksittäisten ergeettisten hiukkasten aiheuttamia vaurioita kutsutaan nimellä Single Event Effects (SEE) [33]. Niitä ovat Single Event Upset, Single Event Transient, Single Event Latchup, Single Event Snapback, Single Event Functional Interrupt, Mutltibit Upset, Single-Event Gate Rupture (SEGR) ja Single-Event Burnout (SEB) [33].

Puolijohdekomponenteista tehotransistoreille yleisimmät vaurioitumistavat ovat SEGR ja erityisesti SEB. SEGR:ssa hilaoksidin läpi tapahtuu virran läpilyönti. SEB:ssa oikosulku tapahtuu nielu-lähde kanavan PN-alueen läpi, mikä rikkoo PN-rajapinnan. Lisäksi avaruuden säteily voi aiheuttaa avaruusaluksen varautumista (spacecraft charging) [36].

Pääsääntöisesti ergeettisiä elektroneja sisältäviä alueita on avaruudessa vähän.

Selvitykseni mukaan ne käsittävät vain planeettojen magneettikenttien tietyt kuoret. Ulommalla Van Allenin vyöhykkeellä olevien elektronien maksimienergia pääsee lähelle mittauksessa käytettyjen elektronien energiaa, joka oli 20 MeV. Tämä energia ei ollut kuitenkaan riittävä rikkomaan komponentteja. Jupiterin magneettikentässä elektronien energiat voivat kuitenkin olla vielä kertaluokkaa suurempia, mikä saattaisi olla liikaa myös tutkituille komponenteille.

Muuten energieettiset elektronit ovat osa energieettisten ionien kokteilia, jota hallitsevat raskaammat ionit. Tällöin on perusteltua suojata avaruusalus nimenomaan näiden raskaampien ionien aiheuttamien ongelmien varalta.

1.2.3 Suojautuminen avaruuden säteilyltä

Materian lähettäminen avaruuteen on hyvin kallista, joskin sen hinta on hieman laskenut kaupallisten toimijoiden tultua mukaan avaruusbisnekseen [27]. Satelliittia ei voida vain laittaa lyijykyuoren sisään, koska se painaisi liikaa. Siksi satelliittien suojaamisen kehittäminen ja tutkiminen on hyvin tärkeää.

Avaruudessa olevaa satelliittia uhkaa pitkänajan kuluessa kertyvä kumulatiivinen säteilyannos, rakennevirheet (displacement damage) ja protonien ja raskaiden ionien aiheuttamat SEE ongelmat [11]. Paras tapa välttää SEE ongelmilta on riskien minimointi etukäteen käyttämällä vain testattuja komponentteja, jotka soveltuvat tulevaan avaruustehtävään [11].

Tehotransistoreja voidaan suojata SEE-ongelmilta käyttämällä niissä turvalliseksi todettuja käyttöjännitteitä (safe-operating area, SOA). Tehotransistorien SOA-rajat voidaan määrittää raskasioni-testien avulla [17].

Kun satelliitti laukaistaan maata kiertävälle radalle pyritään sen kiertorata suunnittelemaan siten, että satelliitti olisi mahdollisimman hyvin säteilyltä suojassa maan magneettikentässä. On myös tyypillistä sammuttaa satelliitin sähköisiä järjestelmiä tiedettäessä, että satelliitti tulee altistumaan voimakkaalle säteilylle. Näin kriittisen vaurion saamisen todennäköisyys pienenee.

Integroiduissa piireissä voidaan käyttää aktiivista virheenkorjausta korjaamaan syntyviä virheitä ja näin parantamaan järjestelmän toimintavarmuutta. Tärkeitä komponentteja voi olla myös useampia kappaleita. Ylimääräinen komponentti voidaan ottaa käyttöön kun varsinaiseen komponenttiin tulee toimintahäiriö ja sitä palautetaan toimintakuntoon [38].

2 Teoreettiset lähtökohdat

2.1 Käsitteet

Gray on SI-järjestelmän yksikkö ionisoivalle säteilylle. Yksi gray vastaa joulen energiaannoksen absorboitumista aineeseen tai ihmiskudokseen. Käytettäväksi yksiköksi suositellaan grayta kun puhutaan muusta kuin ihmiselle haitallisesta säteilystä. Etenkin Yhdysvalloissa käytetään edelleen grayn rinnalla myös yksikköä rad [10]. Yksi gray on 100 rad.

Absorboituneen säteilyannoksen yksikkö on rad, jota käytetään CGS-järjestelmässä (Centimeters–Grams–Second System of Units). Yksi rad vastaa $1 \cdot 10^{-7}$ J energian absorboitumista yhteen grammaan ainetta. Eli siis yksi rad vastaa 0,01 J energiaannoksen absorboitumista kiloon ainetta. Tässä opinnäytetyössä käytetään absorboituneen säteilyannoksen yksikkönä rad-yksikköä, koska se on edelleen laajalti käytössä alan tutkimuksessa [10].

Elektronivoltti eV on yksi SI-järjestelmän yksiköistä energialle. Se vastaa energiämäärää, joka tarvitaan liikuttamaan elektronia yhden voltin sähköisen potentiaalikerroksen ylitse. Koska elektronin alkeisvaraus e on $1,6021766208(98) \cdot 10^{-19}$ C, niin yksi eV on jouleina $1,6021766208(98) \cdot 10^{-19}$ J [10].

2.2 Energiavyömalli

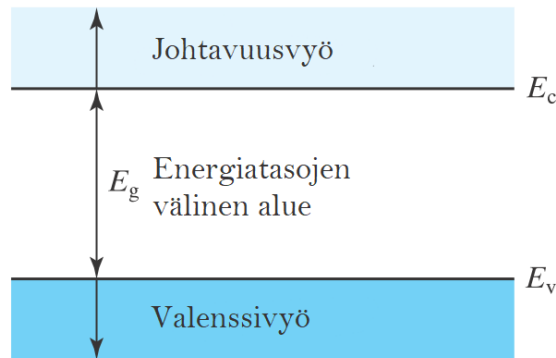
Energiavyömalli on kiinteille aineille sovellettava malli siitä, miten voimakkaasti elektronit ovat sitoutuneena aineeseen ja kuinka helposti ne pystyvät liikkumaan eri energiatasojen välillä [13]. Malli on johdettu kvanttimekaanisista aaltofunktiosta ja sillä pystytään selittämään monia kiinteiden aineiden ominaisuuksia [8].

Vyömallissa aineessa olevilla elektroneilla ajatellaan olevan tietyt sallitut energia-alueet, joilla elektronit voivat olla. Lisäksi mallissa on tietyt kielletyt energia-alueet, joilla elektronit eivät voi koskaan olla. Elektronit täyttävät nämä energiatilat pyrkien aina olemaan mahdollisimman alhaisella energiatilalla. Elektronit ovat fermioneja, joiden spin luku on $\frac{1}{2}$. Siksi ainoastaan kaksi elektronia pystyy olemaan täsmälleen samalla energiatilalla [13].

Energia-alueiden koot ja keskinäiset sijainnit ovat kaikelle aineelle yksilöllisiä ja vaihtelevat jopa saman aineen eri kiderakenteiden välillä [15]. Energiavyömallia voidaan yksinkertaisesti havainnollistaa kuvan 2.1 mukaisella tavalla.

Todennäköisyyttä elektronin löytämiseen tietyltä energiatasolta termisessä tasapainossa olevasta systemistä kuvaa Fermi-funktio $f(E)$

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp((E - E_F)/kT)},$$



Kuva 2.1: Päästäkseen liikkumaan ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta elektronien täytyy siirtyä valenssivyöltä johtavuusvyölle. Kuva C. Hu [15].

missä E_F on energian *Fermi-taso*, E on tutkitun energia-tilan energia, k on boltzmannin vakio ja T lämpötila. Todennäköisyys elektronin löytämiselle Fermi-tasolta on $1/2$. Fermi-tasoa lähinnä olevia sallittuja energiatiloja kutsutaan *valenssivyöksi* ja *johtavuusvyöksi*.

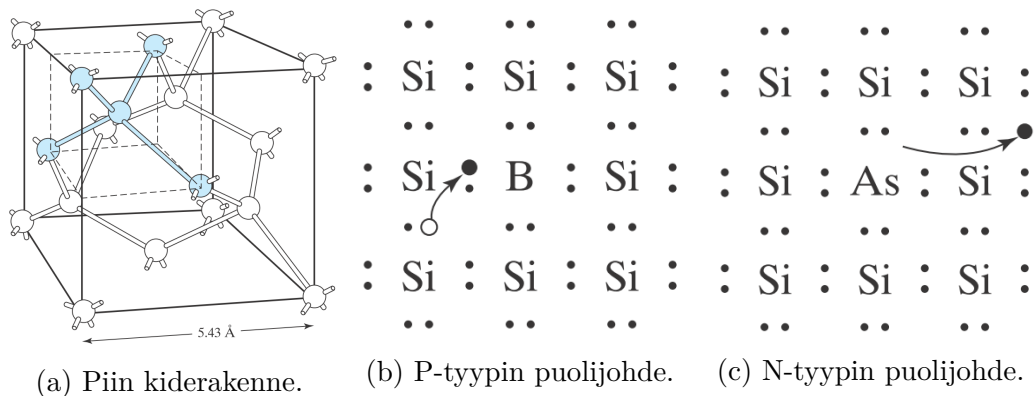
Valenssivyöksi E_v kutsutaan viimeisintä täysin täyttynyttä energiatasoa. Valenssivyöstä seuraavaa energiatasoa kutsutaan johtavuusvyöksi E_c . Jotta elektroni pystyisi liikkumaan eri energiatasojen välillä, sillä tulee olla riittävästi energiaa ylittää energiavöiden välissä oleva energiatasojen välinen alue (band gap). Siihen tarvittavaa energiaa kutsutaan energia-aukon energiaksi E_g .

Metalleilla Fermi-taso asettuu johtavuusvyölle. Johtavuusvyöllä elektronit pystyvät liikkumaan vapaammin, jolloin esimerkiksi ulkoinen sähkökenttä voi synnyttää sähkövirran metallin sisällä.

Puolijohteilla ja eristeillä Fermi-taso asettuu energiatasojen väliselle alueelle. Eristeillä energiatasojen välinen alue on niin suuri, että elektronit eivät pääse ylittämään sitä helposti huoneenlämpötilassa. Koska valenssivyö on täynnä, elektronit eivät pääse liikkumaan siellä kunnolla edes ulkoisen sähkökentän voimasta, jolloin sähkövirta ei synny. Puolijohteilla energiatasolta toiselle siirtymiseen tarvitaan hieman vähemmän energiaa. Tällöin elektronien on helpompi saada riittävä energia-aukon ylittävä energia ulkoisesta sähkökentästä tai lämpöliikkeestä. Näin puolijohteeseen syntyy vapaita varauksenkuljettajia.

2.3 Puolijohteet

Puolijohde on yleensä ryhmän 14 alkuainetta, jota on rikastettu joko ryhmän 13 tai ryhmän 15 alkuaineella. Rikastaminen tapahtuu siten, että puhtaan ryhmän 14 alkuaineen kiderakenteessa osa atomeista korvataan rikastamiseen käytetyn alkuaineen atomeilla. Jos rikastamiseen käytetty alkuaine on ryhmästä 13 syntyy uuteen kiderakenteeseen vajausta elektroneista. Ryhmän 13 alkuaineilla on valenssikuorella yksi elektroni vähemmän kuin ryhmän 14 alkuaineilla. Tällöin kiderakenteeseen syntyy kohtia, joista elektroni puuttuu kuten kuvasta 2.2b nähdään. Tällaista kohtaa



Kuva 2.2: a) Kiderakenteessa piiatomilla on neljä sidosta. b) P-tyypin puolijohdeessa aukot (tyhjä ympyrä) ja elektronit (musta pallo) toimivat varauksenkuljettajina. c) N-tyypin puolijohdeessa on ylimäärä elektroneja. Kuvat C. Hu [15].

kutsutaan *aukoksi*.

Jos toinen elektroni kiderakenteessa siirtyy nyt tämän aukon paikalle, se jättää siirtyessään uuden aukon. Näin aukot voivat liikkua ja niitä voidaankin ajatella positiivisina varauksenkuljettajina, joilla on elektronin varaus. Tällaista puolijohdetta kutsutaan *P-tyypin* puolijohdeeksi [15].

Ryhmän 14 alkuainetta ryhmän 15 alkuaineella rikastettaessa uuteen kiderakenteeseen tulee ylimääräisiä elektroneja, koska ryhmän 15 alkuaineilla on valenssikuorella yksi elektroni enemmän. Nämä ylimääräiset elektronit voivat toimia varauksenkuljettajina. Tällaista puolijohdetta kutsutaan *N-tyypin* puolijohdeeksi. Havainnekuva N-tyypin puolijohdesta on kuvassa 2.2c [15].

2.4 Tehotransistorit

Tehotransistoreilla (power MOSFET) tarkoitetaan tavanomaisia piitransistoreja vahvempia komponentteja, jotka on suunniteltu kestävämmään äärimmäisissä olosuhteissa. Tehotransistoreissa materiaalina käytetään usein piin sijaan piikarbidiä SiC tai galliumnitridiä GaN. Lisäksi lähinnä erityisissä sovelluksissa käytettäviä tehotransistorien materiaaleja ovat galliumarsenidi GaAs ja piigermanium SiGe [25].

2.4.1 Piikarbidi

Piikarbidi SiC on piin ja hiilen muodostama puolijohdeseos, jolla on monia hyväksi havaittuja ominaisuuksia tehotransistorien valmistusta ajatellen [23,25]. Piikarbidi on vuorottelevien hiilen ja piin atomien muodostama kiderakenne. Piikarbidi muodostuu yksiulotteisesta polymorphismista, jota kutsutaan polytyypiksi [23,25]. Piikarbidin eri polytyyppien yksittäiset Si–C sidokset ovat lähes identtisiä ja niiden atomiympäristöt ovat lähes samanlaisia [23]. Ne muodostavat tasoja, jotka voivat pakkautua monella

eri tavalla ja muodostavat lukuisia erilaisia kiderakenteita eli polytyyppejä [23]. Näitä polytyyppejä tunnetaan yli 250 erilaista [12].

Morkog ym. [25] ovat kuvanneet piikarbidin kiderakennetta artikkelissaan seuraavasti. Piikarbidilla on kolme erilaista kiderakennetta, jotka ovat kuutiollinen, heksagonaalinen ja rhombohedraalinen. Kuutiollisella kiderakenteella pakkautunutta piikarbidia kutsutaan 3C SiC. Heksagonaalisella kiderakenteella on lukuisia eri piikarbidin polytyyppejä, mutta niistä puolijohdteellisyydessä käytettyjä ovat 2H-SiC, 4H-SiC ja 6H-SiC, jotka on esitelty kuvassa 2.3.

Nämä polytyypit eroavat toisistaan sidoskulmien perusteella. Kuvassa 2.3a on esitetty 2H-SiC kiteen yksikkökoppi, jonka rakenne koostuu toistuvista sidoksista A ja B. 4H-SiC muodostuu puolestaan kuvan 2.3b mukaisesti. Siinä on kolme erilaista sidosta A, B ja C. Ne vuorottelevat yksikkökopissa järjestyksessä A-B-C-B. 6H-SiC:n yksikkökoppi koostuu kuvan 2.3c mukaisesti myös sidoksista A, B ja C, mutta nyt niitä on kuusi järjestyksessä A-B-C-A-C-B.

Erilainen kiderakenne muuttaa piikarbidin ominaisuuksia selvästi. Esimerkiksi 6H-SiC:in valenssivyön ja johtavuusvyön välinen energia on 2,9 eV kun puolestaan 2H-SiC:lla se on 3,3 eV [25]. Piikarbidin polytyypeistä ainakin 4H-SiC:a ja 6H-SiC:a käytetään elektroniikkakomponenttien valmistukseen. Tähän vaikuttaa niiden hyvien ominaisuuksien lisäksi se, että niitä pystytään valmistamaan luotettavasti ja valmistus on taloudellisesti kannattavaa [23].

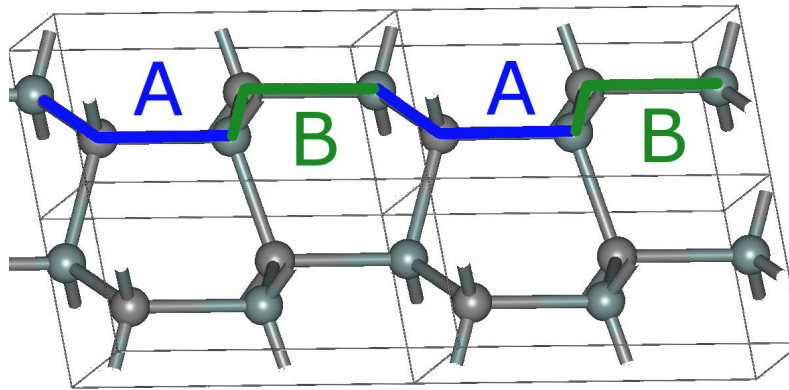
Piikarbidin vahvuuksia ovat muun muassa sen korkea elektronien saturaationopeus, suuri vyörypurkausenttä (avalanche breakdown field), leveä energiatasojen välinen alue, erinomainen lämmönjohtokyky ja kestävyys niin fyysisessä kuin kemiallisessa rasituksessa [23, 25]. Piikarbidin fyysinen kestävyys johtuu vahvasta Si-C sidoksesta, joka mahdollistaa myös hyvän säteilyn keston [25].

Piikarbidia käytetään monessa sovelluksessa, jossa komponentilta vaaditaan kykyä kestää korkeita lämpötiloja, värinää, korroosiota tai kulutusta. Varsinkin raskaassa teollisuudessa on monia kohteita, joissa kestäviä piikarbidikomponentteja hyödyntävät sensorit voidaan asentaa lähemmäksi ääriolosuhteissa toimivia laitteita [23]. Piikarbidikomponentit menevät pienempään tilaan, painavat vähemmän ja kestävät pidempään, kuin haastaviin olosuhteisiin perinteisemmistä puolijohdeista rakennetut suojatut ratkaisut [25]. Tila, paino ja elinikä ovat kaikki tärkeitä muuttujia avaruustekniikkaa rakennettaessa. Siksi piikarbidia käytetään paljon avaruusaluksissa.

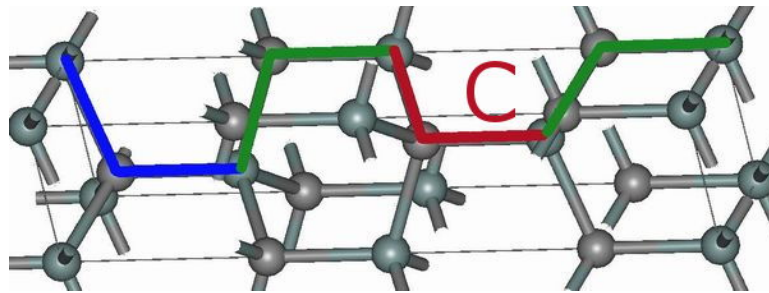
2.4.2 Metalliksi-oksidi-puolijohde MOS

Metalliksi-oksidi-puolijohde (MOS) on puolijohdekomponenteissa yleisesti käytetty rakenne ja transistorin tärkein osa. Se koostuu puolijohdeesta, eristävästä materiaalista valmistetusta hilaoksidista ja tämän päällä olevasta metallielektrodista. Aikaisemmin metallielektrodi oli nimensä mukaan valmistettu metallista, mutta nykyään elektrodin materiaalina käytetään yleisesti monikiteistä piitä. Hilaoksidissa yleinen materiaali on piidioksidi SiO₂ [15].

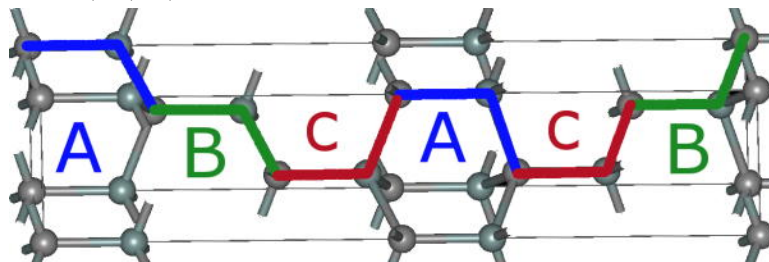
Kuvassa 2.4 on esitetty P-tyyppin MOS-rakenteen energiakaavio [15]. Piiksidin



(a) 2H-SiC rakenne koostuu sidoksista A ja B.

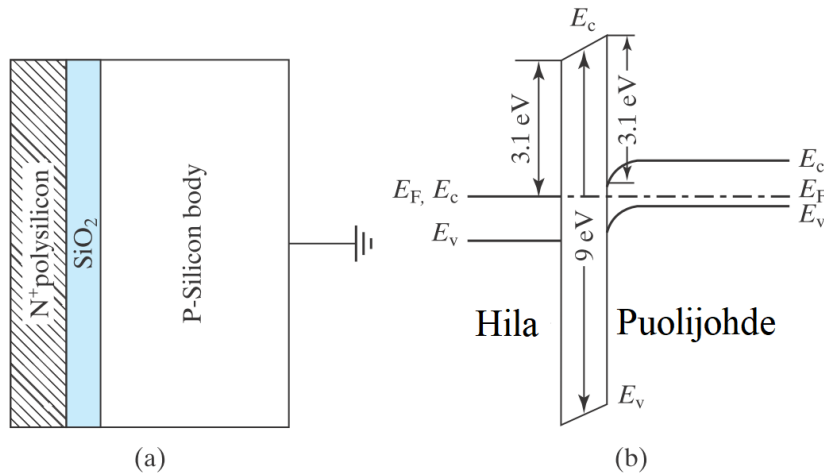


(b) 4H-SiC:n yksikkökoppi on kaksi kertaa 2H-SiC:n pituinen ja muodostuu sidoksista A, B, C, B.

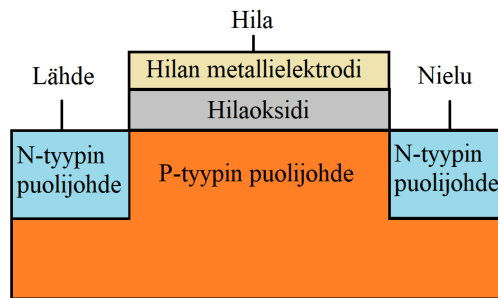


(c) 6H-SiC:n yksikkökoppi on kolme kertaa 2H-SiC:n pituinen ja muodostuu sidoksista A, B, C, A, C ja B.

Kuva 2.3: Heksagonaalisesti pakkautuneiden 2H-SiC, 4H-SiC ja 6H-SiC kiderakenteen jaksollinen eroavaisuus. Kuvat Materials Scientist [20].



Kuva 2.4: P-tyypin metalli-oksidi-puolijohteen a) rakenne b) energiadiagrammi, kun hilalla ei ole jännitettä. Kuvat C. Hu [15].



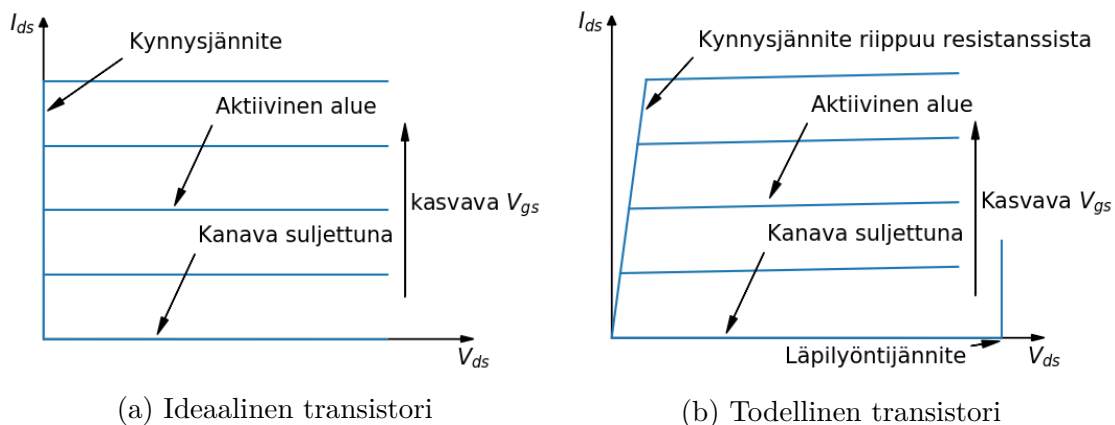
Kuva 2.5: Yksinkertainen N-tyypin transistori

energia-aukon energia E_g on monta kertaa suurempi, kuin puolijohdeella tai metallielektrodilla. Tämä estää varauksenkuljettajia siirtymästä hilan ylitse. Puolijohdeen ja metallielektrodin valenssi- ja johtavuusvyöt ovat yleensä eri tasolla. Puolijohdeen ja hilaoksidin rajapinnassa puolijohdeen johtavuusvyö E_c taipuu kohti elektronien energian Fermi-tasoa E_f . Tällöin rajapintaan syntyy tyhjennysalue, johon alkaa kertymään elektroneja.

Elektrodin jännitettä nostettaessa potentiaaliero koko rakenteen yli kasvaa. Jännitteen kasvaessa puolijohdeen johtavuusvyö ja Fermi-taso lähestyvät toisiaan, kunnes tasot kohtaavat ja tapahtuu tyhjennysalueen inversio. Tällöin puolijohdeeseen avautuu sähköä johtava kanava. Tätä metallielektrodin jännitettä kutsutaan kynnsjännitteeksi V_{th} . [15].

P-tyypin MOS-rakenteen avulla voidaan valmistaa N-tyypin transistori, kun P-tyypin puolijohdeen kumallekin puolelle lisätään N-tyypin puolijohdetta. Yksinkertaisen N-tyypin transistorin rakenne on esitetty kuvassa 2.5.

N-tyypin puolijohde toimii elektronien luovuttajana, kun MOS-rakenteen tyhjennysaluetta kasvatetaan. Inversion tapahtuessa elektronit pääsevät virtaamaan nielulta lähteelle. Jos lähteen ja nielun välille asetetaan tällöin jännite alkaa rakentei-



Kuva 2.6: Kuvassa 2.6a on ideaalisen transistorin virtajännitekuvaajan käyttäytyminen ja kuvassa 2.6b on transistorin virtajännitekuvaajan todellinen käytös.

den välillä kulkea huomattava virta I_{ds} [15]. Tässä työssä transistoreista puhuttaessa tarkoitetaan nimenomaan N–tyypin transistoria.

2.4.3 Transistorin nieluvirran yhtälö

Ideaalisen ja todellisen transistorin IV-käyrät ovat kuvissa 2.6a ja 2.6b. Transistori kytkeytyy päälle, kun transistorin nielun ja lähteen välillä on jännite V_{ds} ja transistorin hilajännitettä V_{gs} kasvatetaan. Todellisessa transistorissa hilavirta I_{ds} ei kytkeydy päälle heti, vaan sen yhtälö noudattaa yleisesti muotoa

$$I_{ds} = k_0 \left[(V_{gs} - V_{th})V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right],$$

missä V_{gs} on transistorin hilajännite, V_{th} on transistorin kynnysjännite ja k_0 on transistorin rakenteesta ja materiaaleista riippuva vakio. Aluetta, jossa virta I_{ds} kasvaa nopeasti jännitteen V_{ds} funktiona, kutsutaan myös ohmiseksi alueeksi.

Todellisen transistorin virta I_{ds} ei pysy vakiona sen saavuttaessa saturaatiotason. Sen sijaan virta kasvaa hitaasti jännitteen V_{ds} funktiona [15]. Saturaatioalueella nieluvirran yhtälö noudattaa yleisesti muotoa

$$I_{ds} = k(V_{gs} - V_{th})^2, \quad (2.1)$$

missä k on transistorin rakenteesta ja materiaaleista riippuva vakio [22]. Tarkemmin k on muotoa

$$k = C_m C_{ox},$$

missä C_{ox} on transistorin oksidin kapasitanssi ja C_m transistorin oksidin fyysisistä mitoista riippuva vakio [22]. Jännite V_{ds} ei voi myöskään kasvaa loputtomiin vaan transistorilla on tietty läpilyöntijännite. Tässä jännitteessä läpilyönti tapahtuu transistorin nielun ja lähteen välillä.

2.4.4 Transistorin kynnysjännite

Transistorin kynnysjännite on se hilajännitteen arvo, jolla transistorin kanava nieltä lähteelle alkaa johtaa. Transistorin kynnysjännite voidaan määrittää $I_{ds}V_{gs}$ -kuvaajasta, johon nieluvirran neliöjuuren arvot on sijoitettu hilajännitteen funktiona. Tällöin transistorin nieluvirran yhtälö (2.1) on suoran muotoinen:

$$\sqrt{I_{ds}} = \sqrt{k}V_{gs} - \sqrt{k}V_{th}$$

Ottamalla derivaatan maksimi $\sqrt{I_{ds}}$ -virran ohmiselta alueelta ja ekstrapoloimalla derivaatan yhtälöä x-akselille, saadaan transistorin kynnysjännite tämän suoran ja x-akselin leikkauspisteestä. Tässä työssä derivaatan maksimiarvo määritellään graafisesti mittauspisteiden joukosta otetun derivaattafunktion perusteella. Derivaatayhtälön laskemiseen käytetään viittä peräkkäistä pistettä, jotka antavat tangenttisuoralle suurimman kulmakertoimen arvon.

2.4.5 Transistorin vuotovirta

Transistorin kanavan ollessa suljettuna ($V_{gs} < V_{th}$) sen läpi kulkee silti pieni virta I_{ds} . Tätä virtaa kutsutaan transistorin vuotovirraksi (*subthreshold current*, *leakage current* tai *weak inversion*).

Vuotovirta syntyy kun P-tyypin kanava on rajapinnalta juuri muuttunut N-tyypin kanavaksi. Tällöin rajapinnalla aukkojen tiheys on edelleen paljon suurempi kuin elektronien tiheys. Pieni elektronien määrä ei riitä tuottamaan suurta sähkökenttää kanavaan ja siksi vuotovirta johtuu pääosin varauksenkuljettajien kuljettumisesta diffuusion avulla [4].

Kirjallisuudessa ja tutkimuksissa on monia erilaisia tapoja ilmaista vuotovirran yhtälöä [4, 15, 22]. P. J McWhorter ja P. S. Winokur kuvaavat hiloksidin varauksen laskemista käsittelevässä tutkimuksessaan [22] vuotovirtaa yhtälöllä

$$I_d = \sqrt{2}C_m \left(\frac{qN_A L_B}{\beta} \right) \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 \exp(\beta\phi_s) (\beta\phi_s)^{-1/2}, \quad (2.2)$$

missä ϕ_s kuvaa johtavuusvyön E_c taipumisen suuruutta hilaoksidin rajapinnassa, N_A on kanavan rikastamiseen käytettyjen atomien tiheys (channel doping), n_i on luontaisten varaustenkuljettajien tiheys (intrinsic carrier concentration) ja q on elektronin alkeisvaraus. Muuttuja β on lämpöjännitteen (thermal voltage) käänteisluku

$$\beta = V_t^{-1} = \frac{q}{kT},$$

missä k on Boltzmannin vakio ja T absoluuttinen lämpötila Kelvineissä. Yhtälössä (2.2) L_B on transistorin Debye pituus, joka saadaan yhtälöstä

$$L_B = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\beta q N_A}},$$

missä ϵ_s on transistorin dielektriivisyysvakio. Vakio C_m on muotoa

$$C_m = \frac{\mu W}{2L},$$

missä W ja L ovat transistorin virtakanavan leveys ja pituus vastaavasti ja μ elektronien liikkuvuuteen virtakanavassa liittyvä vakio.

N. Arora [4] esittää puolestaan hieman yksinkertaistetun vuotovirran simuloimiseen tarkoitettua mallin

$$I_{ds} = I_{pf} V_t^2 e^{\frac{V_{gs} - V_{th}}{\eta V_t}} (1 - e^{-\frac{V_{ds}}{V_t}}). \quad (2.3)$$

Siinä η määrittää kapasitiivista kytkentää hilan ja puolijohteen välillä. η on muotoa

$$\eta = 1 + \frac{C_d}{C_{ox}} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{sb}}},$$

missä C_{ox} on hilaoksidin kapasitanssi pinta-alan yksikköä kohden, C_d on tyhjennysalueen kapasitanssi pinta-alan yksikköä kohden, ϕ_f on fermipotentiali puolijohteessa ja V_{sb} on lähteen ja puolijohteen välinen jännite (substrate bias). γ on rakennemuuttuja (body factor), joka on muotoa

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_b}}{C_{ox}},$$

missä ϵ_{si} on piin dielektriivinen permittiivisyys ja N_b on epäpuhtauden määrä tilavuusyksikköä kohden P-tyyppin puolijohteessa.

Yhtälössä (2.3) I_{pf} on prefaktori termi

$$I_{pf} = \frac{\mu_0 C_{ox} W (\eta - 1)}{L},$$

missä μ_0 on liikkuvuus kanavassa alhaisessa sähkökentässä (low field channel mobility). Tavallisten piitransistorien tapauksessa η saa yleensä arvon väliltä 1–3 [4]. Yhtälöstä (2.3) nähdään myös helposti vuotovirran eksponentiaalinen riippuvuus hilajännitteestä

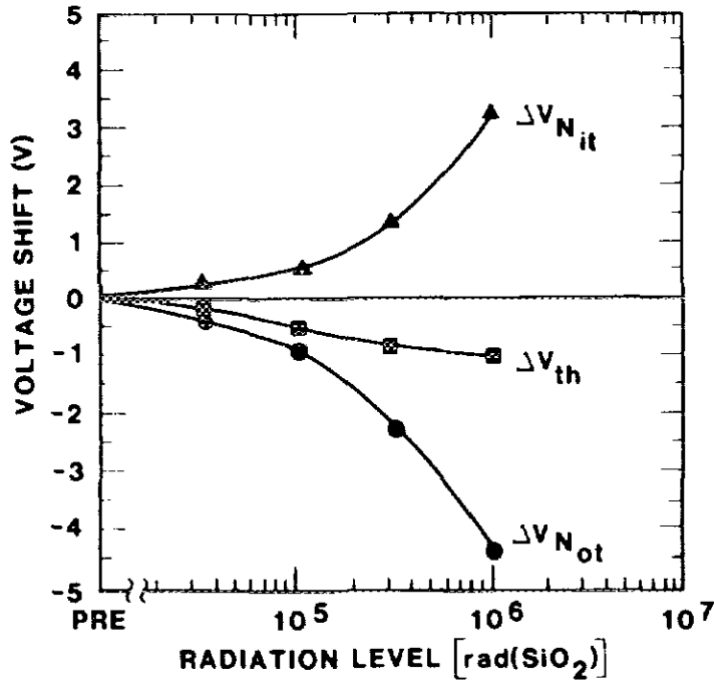
$$I_{ds} \propto e^{\frac{V_{gs} - V_{th}}{\eta V_t}}.$$

2.4.6 Transistorin lämmittäminen

Piikarbiditransistorin kynnyksijännite pienenee lämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu luontaisten varauksenkuljettajien tiheyden kasvamisesta. Lisääntyvän lämpöenergian avulla useampi elektroni pääsee nousemaan johtavuusvyöllä ja toisaalta valenssivyölle syntyy useampia aukkoja [6].

Yhtälöstä (2.3) nähdään, että tavallisen transistorin vuotovirran lämpötilariippuvuus on muotoa

$$I_{ds} \propto V_t^2 e^{V_t^{-1}}. \quad (2.4)$$



Kuva 2.7: Ionisoiva säteilyn hilaoksidiin ja rajapintaloukuihin synnyttämät varaukset ΔV_{ot} ja ΔV_{it} aiheuttavat transistorin kynnysjännitteen arvon muuttumisen. Kuva P. J. McWhorter ja P. S. Winokur [22].

Transistorin vuotovirtaa I_{ds} kasvaa lämpötilan kasvaessa. Lisäksi transistorin lämpötilan nousu kasvattaa sen käyttövastusta (on-resistance) ja pienentää transistorin transkonduktanssia [6].

2.4.7 Transistorin säteilyvaste

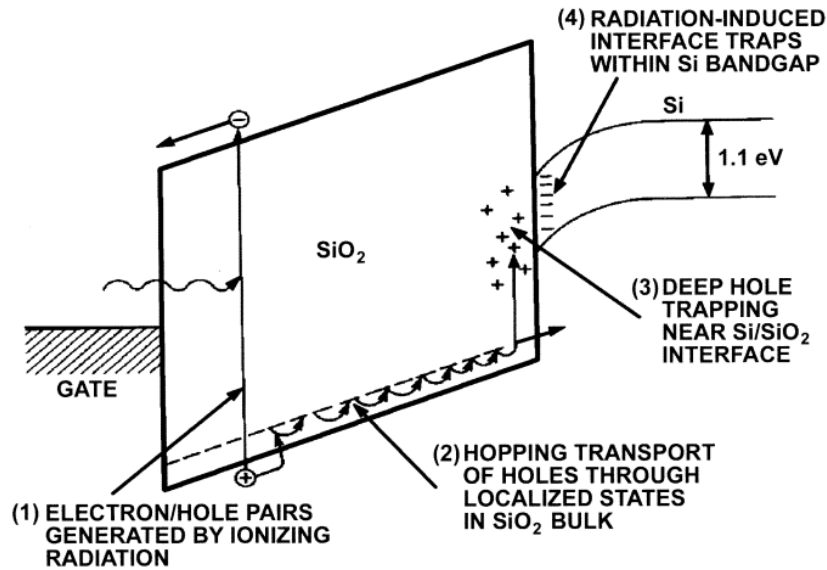
Transistorin kynnysjännitteen muutos säteilytettäessä riippuu transistorin hilaoksidille vangitun varauksen V_{ot} muutoksesta ja hilaoksidin ja puolijohteen rajapintaan loukkuuntuneen varauksen V_{it} muutoksesta eli

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it}. \quad (2.5)$$

Varausten ΔV_{ot} ja ΔV_{it} yhteisvaikutusta transistorin kynnysjännitteen muuttumiseen on havainnollistettu kuvassa 2.7.

Kun transistoria säteilytetään energettisillä elektroneilla alkaa sen rakenteisiin kertyä varausta. Varaus syntyy, kun energettiset elektronit irrottavat elektroneja transistorin kiderakenteesta. Tällöin syntyy elektroni–aukko-pareja [19]. Elektroni–aukko–parin liikkeitä hilaoksidissa esitetään kuvassa 2.8.

Hilaoksidissa elektroni–aukko–parin syntyminen vaatii keskimäärin 17 ± 1 eV energiaa [7]. Oksidissa elektronit lähtevät ajautumaan kohti hilaa ja aukot kohti hilaoksidin ja puolijohteen rajapintaa. Osa syntyvistä aukoista ja elektroneista yhdistyy samantien uudestaan [19].



Kuva 2.8: Elektroni-aukko-parin syntyessä aukko ajautuu elektronia hitaammin pois hilaoksidista, jolloin hilaoksidiin vangitun varauksen V_{ot} määrä muuttuu. Kuva T. R. Oldham ja F. B. McLean [32].

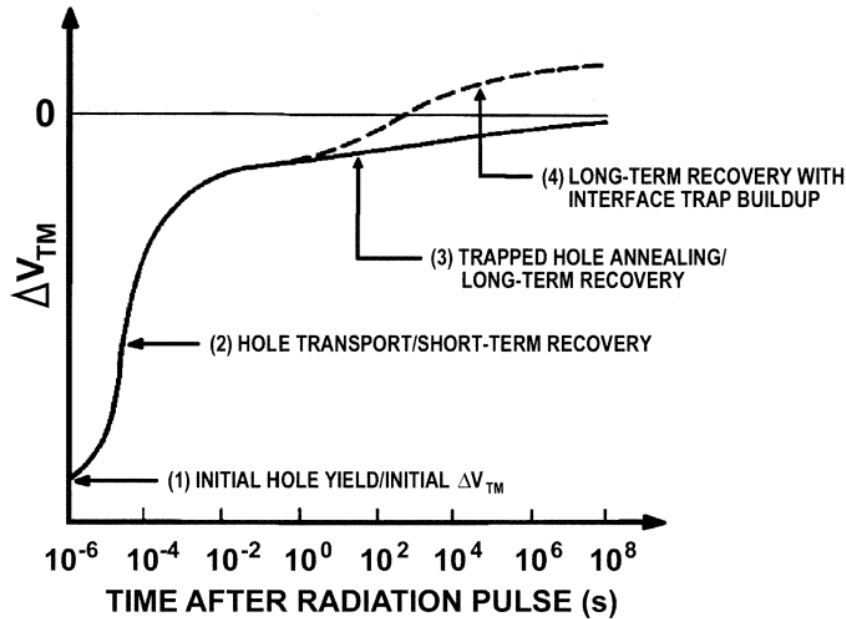
Hilaoksidissa elektronit pääsevät liikkumaan helpommin ja ajautuvat pois hilaoksidista pikosekunnin aikaskaalassa. Sen sijaan aukot liikkuvat hilaoksidissa paljon hitaammin ja jäävät pidemmäksi aikaa synnyinsijoilleen. Tämä aiheuttaa jännitteen ΔV_{ot} muutoksen ja transistorin kynnyksjännitteen pienenemisen [19]. Ionisoivan säteilyn synnyttämien aukkojen elinikää esitetään kuvassa 2.9.

Aukkojen ajautuminen hilaoksidin ja puolijohteen rajapintaan kestää noin sekunnin huoneen lämpötilassa [32]. Tämä aika riippuu hilajännitteestä, lämpötilasta, hilaoksidinpaksuudesta ja jossain määrin myös siitä, miten hilaoksidia on käsitelty [32]. Aukkojen siirtyminen pois hilaoksidista pienentää nopeasti jännitteen ΔV_{ot} muutosta.

Osa syntyneistä aukoista jää kuitenkin jumiin hilaoksidissa esiintyviin loukkuihin. Loukkuuntuneiden aukkojen elinikä vaihtelee muutamasta tunnista useisiin vuosiin ja nämä aukot myös aiheuttavat säteilytyksen jälkeen mitattavan kynnyksjännitteen pienenemisen [32].

Säteily indusoi myös rajapintaloukkuja hilaoksidin ja puolijohteen rajapintaan. Puolijohteen johtavuusvyöllä olevat rajapintaloukut ovat lokaaleja tiloja joihin kertyy elektroneja. Tämä aiheuttaa transistorissa jännitteen muutoksen ΔV_{it} ja kasvattaa kynnyksjännitettä [32].

Hilavangitun varauksen muutos ΔV_{ot} voidaan selvittää laskemalla. Kun hilavangitun jännitteen muutos on saatu selvitettyä, voidaan rajapintavangitun jännitteen muutos selvittää yksinkertaisesti ratkaisemalla ΔV_{it} yhtälöstä 2.5, eli



Kuva 2.9: Suurin osa ionisoivan säteilyn synnyttämistä elektroni-aukko-pareista kulkeutuu sekunnin aikana pois hilaoksidista. Kuva T. R. Oldham ja F. B. McLean [32].

$$\Delta V_{it} = \Delta V_{th} - \Delta V_{ot}.$$

Kynnysjännite ei välttämättä muutu lineaarisesti säteilyannoksen funktiona. Shaneyfelt ym. [35] säteilyttivät röntgensäteillä N-tyyppin transistoreja, joiden virtakanavien pituudet vaihtelivat. Säteilytettäessä transistorien kynnysjännite ei muutu lineaarisesti säteilyannoksen funktiona, kuten kuvasta 2.10 voidaan nähdä.

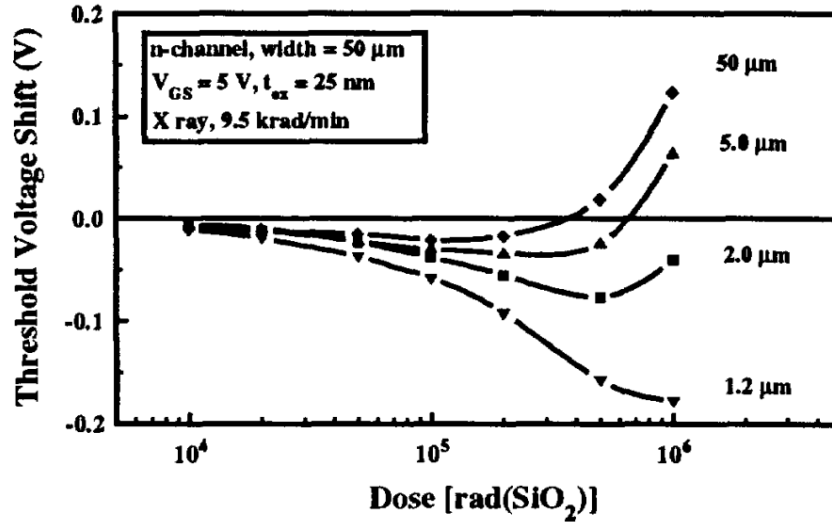
Transistorilla, jonka kanava oli lyhyin, kynnysjännitteen muutos kiihtyi säteilytyksen loppuakohden. Pidemmän kanavan omaavilla transistoreilla kynnysjännitteen muutos puolestaan vaihtoi suuntaa säteilyannoksen kasvaessa ja säteilytyksen lopussa osalla transistoreissa kynnysjännitteen muutos oli ollut jopa positiivista.

2.4.8 Hilaoksidiin vangitun varauksen muutoksen laskeminen

P. J. McWhorter ja P. S. Winokur [22] ovat kehittäneet menetelmän, jolla transistorin hilaoksidiin vangitun varauksen muutos ΔV_{ot} voidaan laskea. Transistorille täytyy ensin laskea sekä kynnysvirta I_{th} (threshold current) että midgap-virta I_{mg} .

Kynnysvirta I_{th} on transistorin virran arvo siinä pisteessä, kun hilajännite on kynnysjännitteen suuruinen. Kynnysvirta voidaan määrittää graafisesti kuvaajasta tai laskea yhtälön (2.1) avulla.

Midgap-virta I_{mg} on transistorin vuotovirta siinä tilanteessa, jossa johtavuusvyö on hilaoksidin rajapinnalla taipunut energiatasojen välisen alueen puoleenväliin. Tällöin



Kuva 2.10: Pitkäkestoisen säteilytyksen aikana transistorien kynnyksjännite V_{th} voi pienentyä tai kasvaa reilusti. Tämä riippuu transistorin rakenteesta. Kuva Shaneyfelt ym. [35].

johtavuusvyön taipuminen ϕ_B on

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{N_i}\right).$$

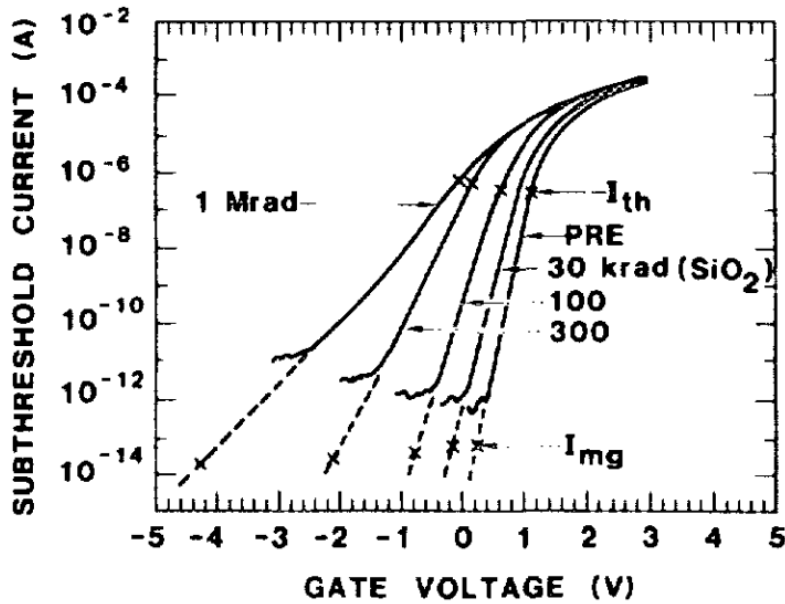
Tällöin midgap-virta voidaan laskea yhtälöstä (2.2). Midgap-virran suuruusluokka on yleensä 0,01 – 0,1 pA [22].

Kuvan 2.11 mukaisesti $(\log(I_d), V_g)$ -kuvaajasta pystytään määrittämään suora kynnysvirran arvosta midgap-virran arvoon ekstrapoloimalla suora vuotovirran käyrän suuntaisesti. Määritetyn suoran ja midgap-virran leikkauspisteestä saadaan ensimmäinen arvo. Toinen arvo voidaan määrittää samalla tavalla uudesta mittauksesta, jolloin saadaan laskettua ΔV_{ot} .

2.4.9 Kynnyksjännitteen muutoksen analysoiminen graafisesti

Kynnyksjännitteen muutosta voidaan arvioida myös graafisesti. Transistorin virran I_{ds} ja jännitteen V_{gs} arvot voidaan mitata ennen säteilytystä ja sen jälkeen. Mittauksesta saadut piste-parit voidaan sijoittaa $(\log(I_d), V_g)$ -kuvaajaan. Jos transistorin kynnyksjännite ei muutu mittausten aikana pitäisi kaikkien kuvaajien olla päällekkäin. Jos taas säteilytyksen jälkeen mitattu käyrä on siirtynyt vasemmalle on transistorin kynnyksjännite on pienentynyt [22].

Oksidiin loukkuuntunut varaus V_{ot} siirtää $(\log(I_d), V_g)$ -käyrää vasemmalle, mutta ei muuta sen muotoa [22]. Tätä käyrän käyttäytymistä havainnollistetaan kuvassa 2.11. Jos puolestaan transistorin $(\log(I_d), V_g)$ -käyrät ovat selvästi vääntyneitä toisiinsa nähden on syy todennäköisesti rajapintavangitun jännitteen V_{it} muutoksessa [22]. Tämä voidaan nähdä kuvassa 2.11 kun verrataan $(\log(I_d), V_g)$ -käyriä 300 krad ja



Kuva 2.11: Hilaoksidiin kertyneen varauksen muutos ΔV_{ot} voidaan laskea niiden pisteiden väliltä, joissa transistorin kynnysvirran I_{th} arvosta ekstrapoloitu suora leikkaa transistorin midgap-virta I_{mg} suoran. Kuva P. J. McWhorter ja P. S. Winokur [22].

1000 krad säteilyannosten jälkeen.

2.5 Energeettisten elektronien energia ja transistorin säteilyannos

Energeettisen elektronin aineelle luovuttaman energian (linear energy transfer) määrään vaikuttaa elektronin energian lisäksi absorboivan aineen materiaali ja matka, jonka elektroni kulkee materiaalissa. Tässä tutkimuksessa käytetään elektroneja, joiden energia on 20 MeV. Piikarbiditransistoreille annettu säteilyannos on 1000 krad minuutissa veteen. Jos todellinen transistoreihin kohdistuva säteilyannos halutaan saada selville, veteen absorboituneen säteilyannoksen määrä täytyy muuttaa vastaamaan piikarbidisiin absorboituneen säteilyannoksen määrää.

3 Mittausasetelma

Tässä tutkimuksessa suoritettiin viisi mittausta. Niissä tutkittiin miten piikarbidipohjaiset tehotransistorit reagoivat elektronisäteilytykseen. Lisäksi haluttiin selvittää aiheuttaako säteilytys transistoreihin muutoksia, jotka ilmenisivät niitä lämmitettäessä. Mittauksista kaksi tehtiin kiihdytinlaboratoriossa ja kaksi lämpökaapin avulla. Mittausasetelma koottiin uudelleen jokaista mittausta varten.

3.1 Tutkittavat komponentit ja mittausvälineet

Tutkimuksessa käytetään piikarbidipohjaisia tehotransistoreja. Tutkittavaksi valikoitui Wolfspeedin (ent. Cree) valmistamat C2M0080120D- ja C2M1000170D-mallin tehotransistorit 3.2a. Kummankin transistorimallin kestävyyttä on aikaisemmin testattu energettisillä neutroneilla [2]. Lisäksi C2M0080120D-mallin transistorin hajoamista on tutkittu raskaiden ionien avulla [48].

Molemmat transistorit ovat N–tyypin metallioksidi-puolijohdekanavatransistoreja eli MOSFET-transistoreja (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). Transistorien tärkeimmät tekniset tiedot mittausten kannalta on esitelty taulukossa 3.1.

3.1.1 Keithley 2410 ja Keithley 2636

Tässä tutkimuksessa käytetään kahta Keithley Instrumentsin valmistamaa virtamittaria. Transistoreille annetaan nielujännite Keithley 2410 -mittalaitteella, joka on kuvassa 3.1. Transistorien hilajännitettä V_{gs} ohjataan Keithley 2636 -mittalaitteella. Virtamittarien tärkeimmät tekniset tiedot on esitelty taulukossa 3.2.

3.1.2 Keithley 2290-PM-200 ylijännitesuoja

Tässä tutkimuksessa yhdelle transistorille annetaan jännitettä kahdesta eri mittalaitteesta. Tutkimuksen luonteesta johtuen on odotettavissa, että tutkittava transistori

Taulukko 3.1: Mittauksessa käytettyjen transistorien hilajännitteen suositellut ylä- ja alarajat $V_{gs}^{max/min}$ ja nielujännitteen yläraja V_{ds}^{max} [49, 50].

	C2M0080120D	C2M1000170D
V_{gs}^{min}	−5 V	−5 V
V_{gs}^{max}	20 V	20 V
V_{ds}^{max}	1200 V	1700 V

Taulukko 3.2: Taulukossa on mittauksessa käytettyjen virtamittarien suurin käyttöjännite V_{max} , suurin käyttövirta I_{max} ja suurin sallittu teho P_{max} .

	Keithley 2410	Keithley 2636
V_{max}	± 1100 V	± 202 V
I_{max}	1 A	1 A
P_{max}	22 W	22 W

hajoaa. Hajoaminen voi tapahtua myös siten, että transistorin nielu ja hila menevät oikosulkuun. Tällöin korkeammalla jännitteellä toimiva Keithley 2410 voisi rikkoa Keithley 2636 -mittalaitteen. Siksi Keithley 2636 -mittalaitetta suojataan Keithley Instrumentsin valmistamalla Keithley 2290-PM-200 -ylijännitesuojalla.

Ylijännitesuoja on kuvassa 3.2b. Ylijännitesuoja kytketään sarjaan mittalaitteen ja mitattavan komponentin väliin. Suojamoduuli kestää jopa 10000 V jännitteen. Jos suojamoduuliin tulee korkean jännitteen puolelta liian suuri jännite, se ohjautuu maadoituskaapeleita pitkin turvallisesti maahan.

3.1.3 Testilevy

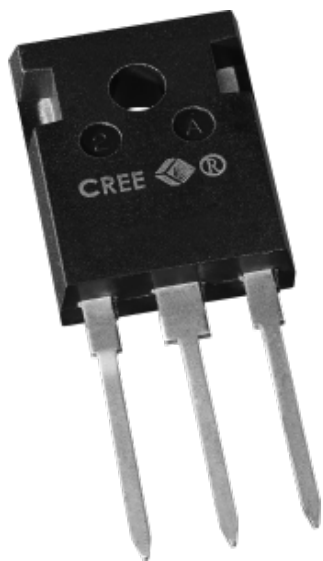
Tässä tutkimuksessa käytetty testilevy on kuvissa 3.3a ja 3.3b. Se on suunniteltu transistorien säteilynkestävyyssmittauksia varten. Testilevyllä on neljä kolmepaikkaisista riviliitintä transistorien kiinnittämistä varten. Riviliittimet on valittu siten, että niihin sopii TO-247-3 -standardin mukainen komponentti. Riviliittimen keskipaikka on tarkoitettu transistorin lähteelle ja reunapaikkoihin kytketään nielu ja hila. Jokaisen transistorin hilalle ja nielulle tulee oma BNC-liitin. Kaikki BNC-liittimet jakavat yhteisen referenssipisteen eli maan.

3.1.4 Linearikiihdytin

Säteilyttämiseen käytettiin Varian Clinic lineaarikiihdytintä. Linearikiihdyttimellä pystytään tuottamaan 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 16 MeV ja 20 MeV elektronisuihkuja. Annosnopeutta pystytään säätämään välillä 100–1000 rad(H_2O)/min siten, että

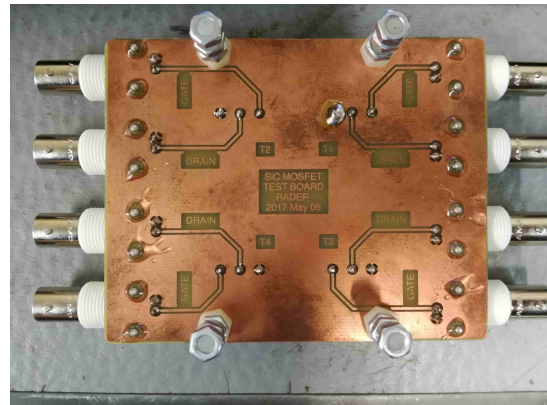
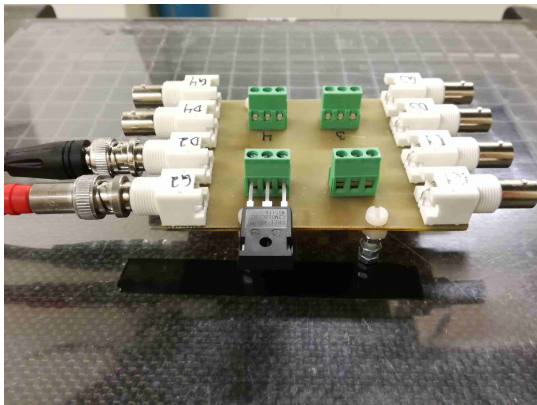


Kuva 3.1: Keithley 2410 mittarilla pystytään asettamaan jopa 1100V käyttöjännite transistorille.



(a) TO-247-3-standardin mukainen kotelo. (b) Keithley 2290-200-PM ylijännitesuojamoduuli.

Kuva 3.2: Kuvassa 3.2a TO-247-3-standardin mukainen kotelo, johon molemmat transistorit on pakattu. Kuvassa 3.2b Keithley 2290-200-PM ylijännitesuojamoduuli, joka kestää jopa 10000 V jännitteen.



(a)

(b)

Kuva 3.3: Työssä käytettyyn piirilevyyn on mahdollista asettaa neljä transistoria yhtä aikaa. Mittauksissa piirilevyllä oli kiinni yksi transistori kerrallaan, kuten kuvassa (a). Kuvasta (b) nähdään, miten jokaiselle riviliittimelle tulee jännitteet omasta BNC-liittimestä, mutta ne kaikki on kytketty samaan maahan.

suurin yksittäisessä ajossa saavutettu annos on 10 krad. Yhtäkestoisia annoksia voidaan antaa peräkkäin, joten myös suurempien kokonaisannosten antaminen on mahdollista. Elektronikiihdyttimen antama $100\text{--}1000 \text{ rad}(\text{H}_2\text{O})/\text{min}$ säteilyannos on kalibroitu siten, että absorboivana aineena on vesi.

3.1.5 Weisstechnik lämpökaappi

Tämän tutkimuksen lämpötilamittaukset tehtiin Weisstechnik WK3-180/40 R300 -lämpökaapissa. Lämpökaapilla pystytään saavuttamaan alimmillaan -42 C° lämpötila, ja korkeimmallaan kaapin saa lämmitettyä aina 180 C° lämpötilaan saakka. Lämpökaappi pystyy pitämään oikean lämpötilan $\pm(0,1\text{--}0,5) \text{ C}^\circ$ tarkkuudella, ja lämpötila voi vaihdella $(0,5\text{--}1,5) \text{ C}^\circ$ eri alueilla kaapin sisällä [47].

3.2 Mittalaitteiden ohjaaminen

Kumpaakin Keithleyn mittalaitetta ohjataan etänä tietokoneelta. Tietokone on yhdistetty USB/GPIB -ohjauslaitteella mittalaitteisiin. Komennot mittalaitteelle annetaan Python-ohjelmointikiellä mittauksia varten kirjoitetulla graafisella käyttöliittymällä.

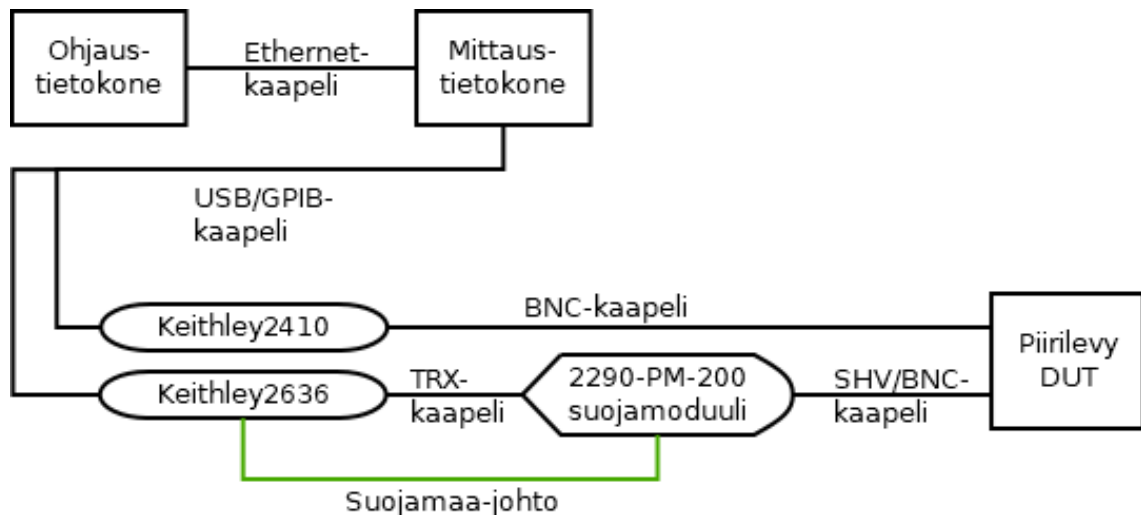
Elektronisäteilytysmittauksia tehtäessä mittaustietokonetta etäohjataan vielä toisella tietokoneella, koska mittauskonetta ei saada riittävän etäälle säteilytettävistä komponenteista. Tällöin tietokoneet yhdistetään toisiinsa ethernet kaapelilla ja yhteys muodostetaan Windows Remote Desktop -ohjelmalla.

3.3 Mittausasetelma säteilytyksen vaikutuksen mittaamiseen

Mittausasetelman kytkentäkaavio on nähtävissä kuvassa 3.4. Tutkittava komponentti (Device Under Test, DUT) on kiinni piirilevyssä. Säteilytysmittauksessa piirilevyyn on kytkettynä vain yksi transistori.

Nielulle tuleva BNC-liitin on suoraan yhteydessä Keithley 2410 -mittalaitteeseen. Hilalle tuleva BNC-liitin kytketään BNC/SHV -adapterikaapelilla Keithleyn 2290-PM-200 -suojamoduuliin. Keithleyn 2290-PM-200 -suojamoduulista lähtee erillinen maadoitusjohto mittalaitteiden yhteiseen maahan. Suojamoduuli on yhdistetty triaxial-kaapelilla Keithley 2636 -mittalaitteeseen. Suojamoduuli kytkentöineen on esiteltynä kuvassa A.2. Keithleyn mittalaitteet on kytkettynä toisiinsa GBIP-kaapelilla, ja Keithley 2636 on kytketty GPIB/USB -adapterikaapelilla mittaustietokoneeseen. Kokonaisuudessaan tämä mittausasetelma on samassa tilassa lineaarikiihdyttimen kanssa, kuten kuvasta A.1 voidaan nähdä.

Mittauslaitteiden ja komponentin väliin laitetaan parafiniharkkoja vaimentamaan mittalaitteiden suuntaan tulevaa säteilyä. Mittaustietokone on yhdistetty 20 m ethernet-kaapelilla ohjaustietokoneeseen, jolla ohjataan mittaustietokonetta Windows Remote Desktop -ohjelmaa käyttäen. Ohjaustietokone on samassa tilassa, josta lineaarikiihdytintä ohjataan.



Kuva 3.4: Kytkentäkaavio säteilytysmittauksen mittausasetelmasta.

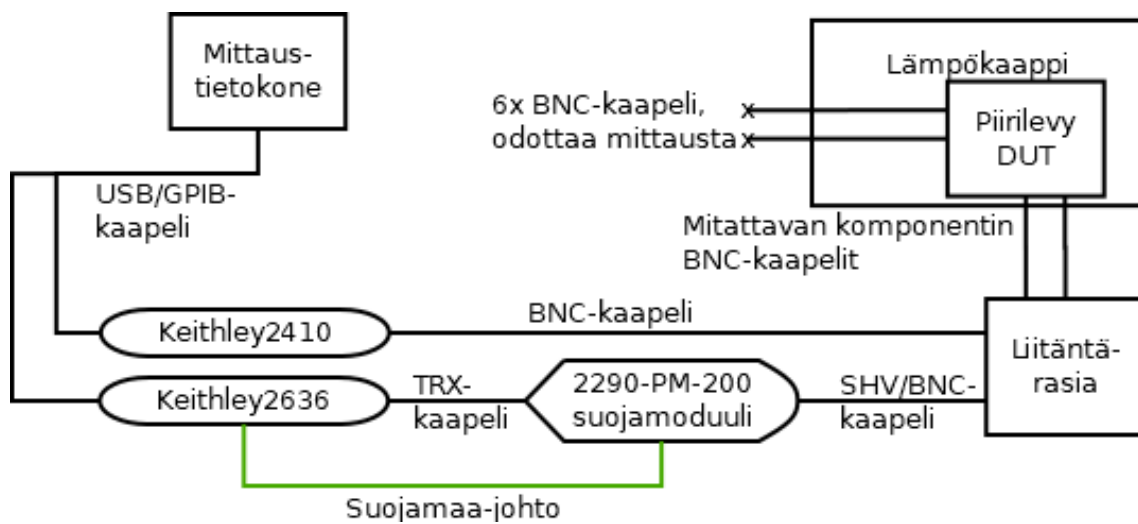
3.4 Mittausasetelma lämpötilan vaikutuksen mittaamiseen

Lämpötilamittausten kytkentä on kuvassa 3.5. Lämpötilamittauksissa tutkitaan miten lämpötilan vaihtelut vaikuttavat transistorin toimintaan. Mittauksissa voidaan tutkia yhdestä neljään komponenttia kerrallaan. Tutkittavat komponentit laitetaan piirilevylle, ja piirilevy asetetaan Weisstechnik WK3-180/40 R300 -lämpökaapiin. Jokaiselta piirilevyyntä kiinnitettyltä komponentilta vedetään kaksi BNC-kaapelia lämpökaapin ulkopuolelle.

Lämpökaapin ulkopuolella on erillinen liitännärasia, jonka ulostuloihin vaihdetaan kahta piirilevyltä tulevaa BNC-kaapelia sen mukaan, mitä komponenttia halutaan mitata. Tulevissa mittauksissa tutkittavan komponentin BNC-kaapelit kannattaa yhdistää mittausjärjestelmään tarkoitukseen suunnitelluilla BNC-liittimillä.

Toinen liitännärasian ulostuloista on yhdistettynä suoraan Keithley 2410 -mittalaitteeseen ja toinen BNC/SHV -adapterikaapelilla 2290-PM-200 -suojamoduuliin. Suojamoduuli on maadoitettu erillisellä suojamaajohdolla. Lisäksi suojamoduulilta lähtee kaksi triaxial-kaapelia Keithley 2410 -mittalaitteeseen.

Keithleyn mittalaitteet on kytkettynä toisiinsa GBIP-kaapelilla ja Keithley 2636 on kytketty GPIB/USB -adapterikaapelilla mittaustietokoneeseen. Tätä mittausta ohjataan suoraan mittaustietokoneelta lämpökaapin vierestä.



Kuva 3.5: KytKentä lämpötilamittausten mittausasetelmasta.

4 Mittaukset

Tässä tutkimuksessa suoritettiin viisi mittausta. Kolmessa tarkkailtiin lämpötilan vaikutusta transistoriin ja kahdessa säteilyn vaikutusta. Säteililytyksessä käytettiin energettisiä elektroneja.

Ensimmäisessä säteilytysmittauksessa haluttiin selvittää, kuinka helposti piikarbiditransistori hajoaa, kun sitä säteilytetään. Toisessa säteilymittauksessa selvitettiin säteilytyksen aiheuttamia pienempiä muutoksia piikarbiditransistorissa. Lämpötilamittauksista kerättiin lisätietoa säteilyn mahdollisista vaikutuksista piikarbiditransistoriin.

Transistorien ominaisuuksien muutoksia tutkittiin mittaamalla niiden nieluvirtaa I_{ds} nielujännitteen V_{ds} funktiona ja nieluvirtaa I_{ds} hilajännitteen V_{gs} funktiona. Mittausaineistoa havainnollistettiin I_dV_d - ja I_dV_g -kuvaajilla. Kuvaajissa käytetään yleisesti logaritmistä asteikkoa kuvaajan y-akselilla, jotta pienillä virranarvoilla tapahtuvat ilmiöt tulevat paremmin näkyviin.

4.1 Ensimmäinen säteilytysmittaus

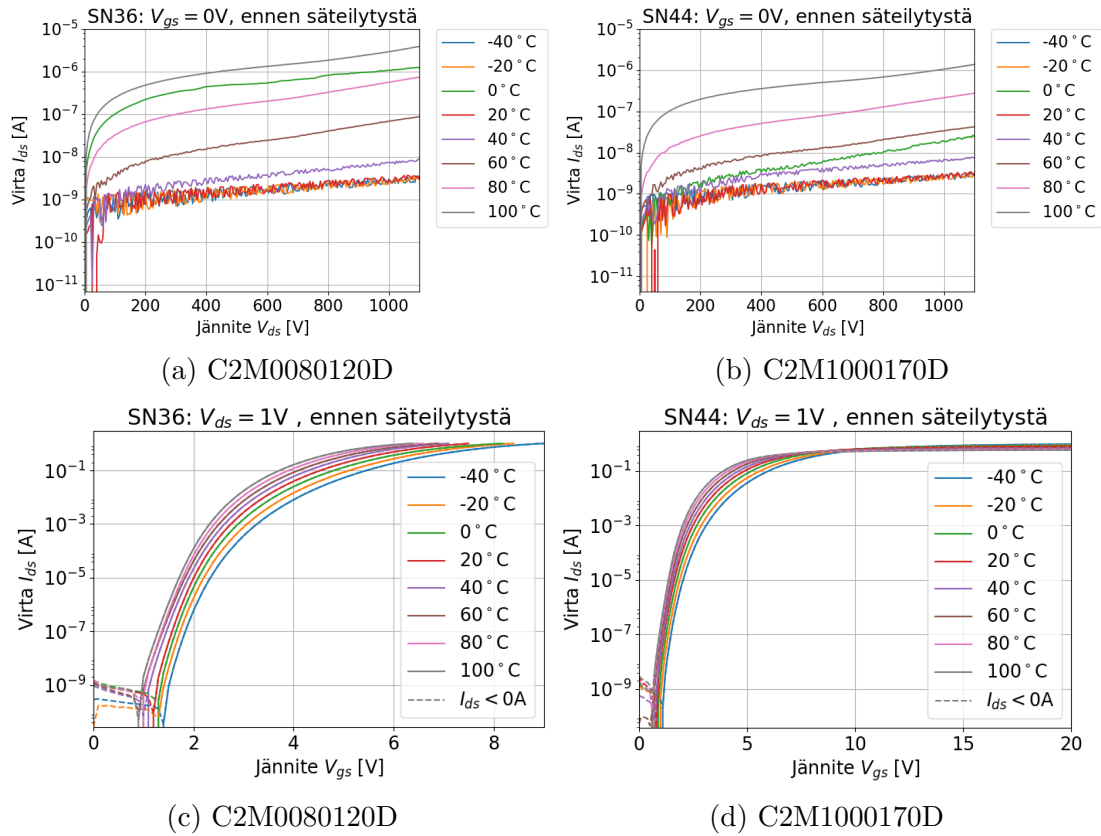
Ensimmäisessä mittauksessa tarkoituksena oli selvittää, millä biasjännitteiden V_{gs} ja V_{ds} arvoilla piikarbidipohjainen C2M0080120D-mallin transistori hajoaa. Ensimmäisessä mittauksessa havaittiin, että C2M0080120D-mallin transistori pysyi toimintakuntoisena. Transistoria säteilytettiin 20 MeV elektronisuihkulla ja 1000 rad(H_2O)/min annosnopeudelle nielujännitteen ja hilajännitteen ollessa mahdollisimman suuria eli $V_{ds} = 1100$ V ja $V_{gs} = -5$ V vastaavasti.

4.2 Alustava lämpötilamittaus

Alustavassa lämpötilamittauksessa piirilevy asetettiin lämpökaappiin, ja piirilevylle kiinnitettiin C2M0080120D-mallin piikarbiditransistorit SN34 ja SN35 ja C2M1000170D-mallin piikarbiditransistorit SN42 ja SN43.

Lämpötilamittaus aloitettiin -40 C° lämpötilasta, josta lämpötilaa lähdettiin nostamaan 20 C° kerrallaan aina 100 C° saakka. Tätä korkeammassa lämpötiloissa pitäisi käyttää erikoisvalmisteisiä BNC-kaapeleita, sillä RG59-RF -mallin kaapeleita suositellaan käytettäväksi korkeintaan 80 C° lämpötilassa [39].

Transistorien I_dV_d - ja I_dV_g -käyrät mitattiin edellä mainituissa lämpötiloissa. Transistorin I_dV_d -käyrää mitattaessa transistori asetettiin ei-johtavaan tilaan, jolloin hilajännite V_{gs} oli 0 V. Nielujännitettä V_{ds} nostettiin askel kerrallaan 0 V aina 1100 V saakka yhden jänniteaskeleen ollessa 5 V. I_dV_g -käyrää mitattaessa nielujännite oli

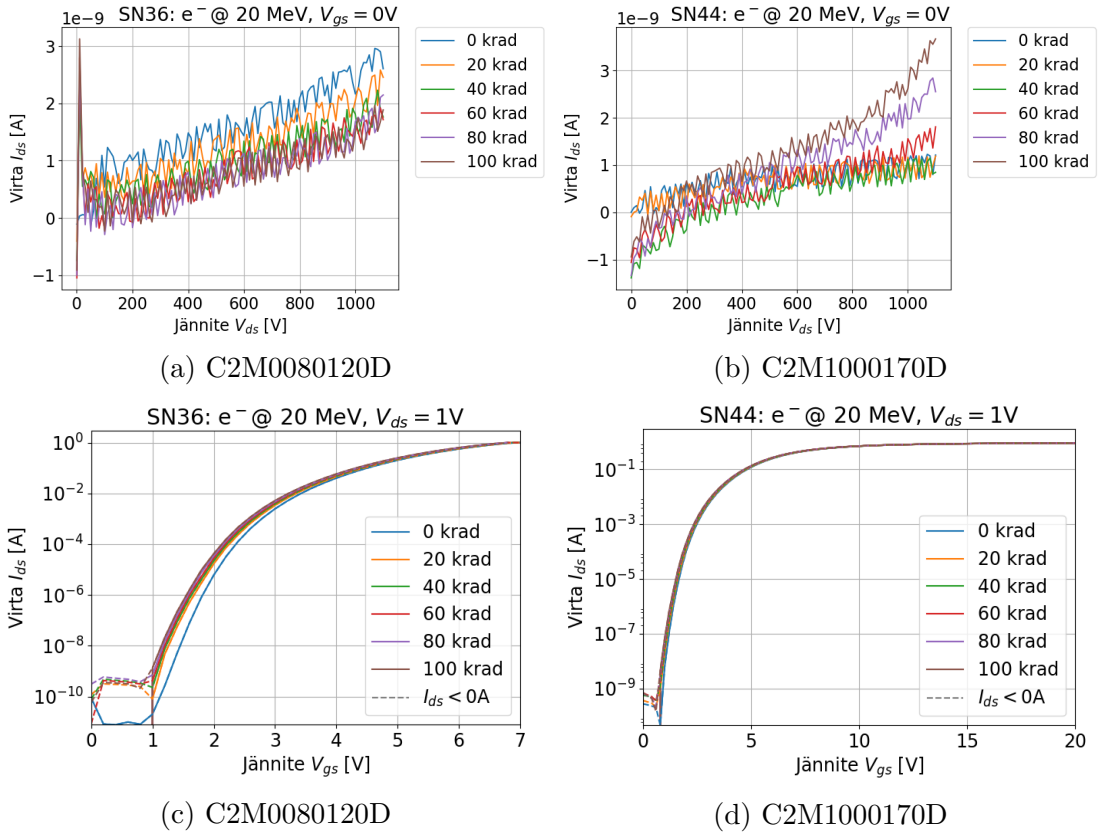


Kuva 4.1: Transistorien eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_d$ -kuvaajat ovat kuvissa (4.1a) ja (4.1b). Transistorien kanavan avautumista eri lämpötiloissa vertaillaan kuvissa (4.1c) ja (4.1d).

1 V ja hilajännitettä nostettiin askel kerrallaan 0 V aina 20 V saakka. Yhden jänniteaskeleen suuruus oli 0,2 V.

Lämpötilan arvot luettiin lämpökaapin näyttämästä lukemasta. Tämän lisäksi lämpötilanmuutosta tarkkailtiin mittaamalla yhden transistorin nielulta lähteelle kulkevaa virtaa I_{ds} ajan funktiona, kun transistorin nielujännite oli 2 V ja hilajännite oli 1 V. Mittaukset aloitettiin kun lämpötila kaapin sisällä oli tasaantunut. Kaapin lämpötila oletettiin tasaantuneeksi kun transistorin nieluvirta ei enään muuttunut.

Mittauksissa havaittiin odotusten mukaisesti, että transistorin $I_d V_d$ - ja $I_d V_g$ -käyrät muuttuivat lämpötilan muuttuessa. Käyrien muutokset voidaan nähdä mittausdatan perusteella tehdyistä kuvaajista 4.1. Transistorien kynnysjännite pienentyi ja vuotovirta kasvoi. Ainoastaan 0 C° lämpötilassa transistorien $I_d V_d$ -käyrä käyttäytyi poikkeavalla tavalla. Tämä näkyy kuvaajissa 4.1a ja 4.1b, missä vihreällä viivalla yhdistetty pistejoukko kuvaa vuotovirtaa 0 C° lämpötilassa. Vuotovirta on tässä lämpötilassa kertaluokkaa suurempaa, kuin -20 C° tai 20 C° lämpötilassa.



Kuva 4.2: Transistorien I_dV_d - ja I_dV_g -käyrien muutokset säteilytyksen aikana.

4.3 Toinen säteilytysmittaus

Toinen säteilytysmittaus tehtiin C2M0080120D- ja C2M1000170D-mallin transistoreille, joille oli myös tehty alustava lämpötilamittaus. Säteilytykseen päätyivät komponentit SN36 ja SN44. Mittaus tehtiin yhdelle transistorille kerrallaan. Säteilytysmittauksessa yhdelle transistorille annettiin 100 krad(H_2O) annos 20 MeV elektronisuihkulla. Säteilytyksen aikana transistorin nielujännitettä V_{ds} pidettiin 1100 V:ssa ja hilajännite V_{gs} oli $-5 V$.

Ennen säteilytystä transistorin I_dV_d - ja I_dV_g -käyrät mitattiin. Tämän jälkeen mittaukset toistettiin 20 krad säteilyannoksen välein. Mitauksessa pystyttiin havaitsemaan, että transistorin säteilyttäminen pienensi sen vuotovirtaa kuten kuvaajista 4.2a ja 4.2b nähdään. Säteilyttäminen aiheutti myös sen, että transistorin kynnyksenjännite odotetusti pieneni joka säteilytyksen jälkeen, kuten kuvaajista 4.2c ja 4.2d voidaan nähdä.

4.4 Säteilytyksen jälkeinen lämpötilamittaus

Lämpötilamittaus toistettiin säteilytetyille transistoreille SN36 ja SN44. Tämä tapahtui noin 48 tuntia toisen säteilytysmittauksen jälkeen. Mittaus toistettiin mahdol-

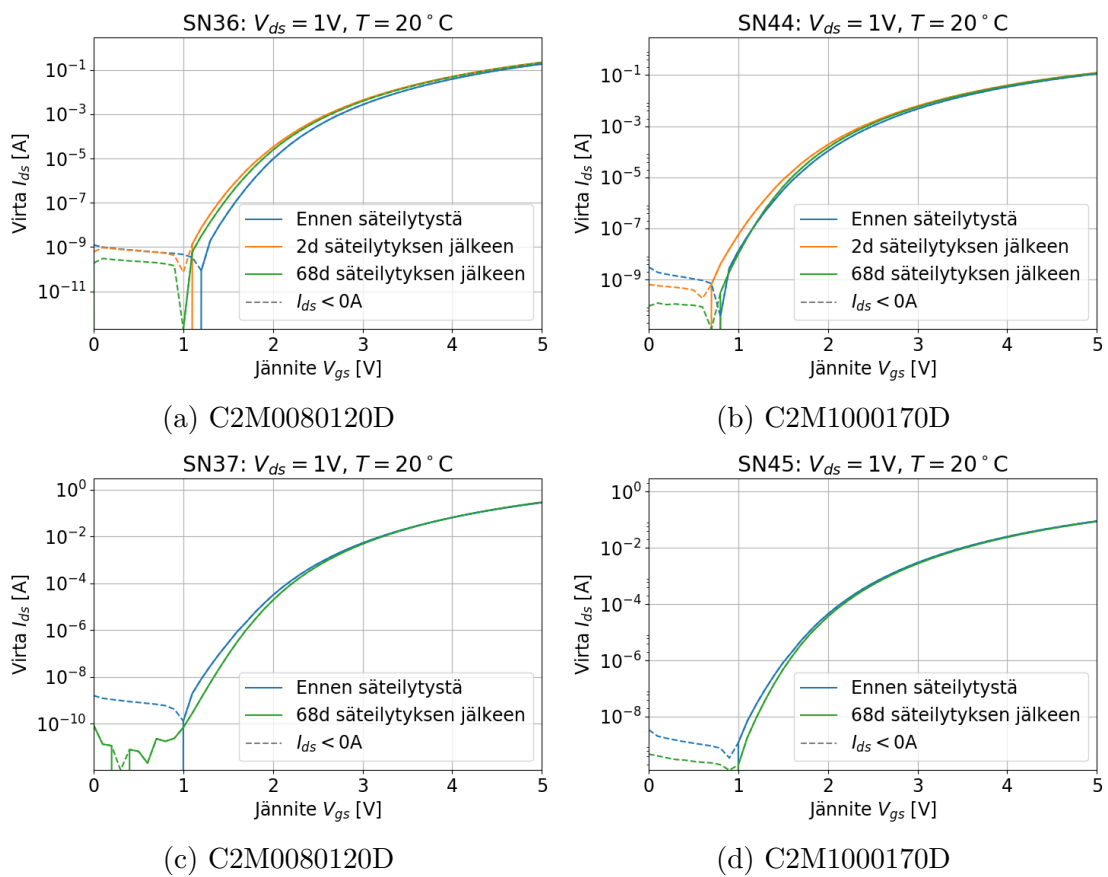
lisimman tarkasti samalla tavalla kuin ensimmäinen lämpötilamittaus. Mittauksissa käytetyt kaapelit vaihtoivat kuitenkin todennäköisesti keskenään paikkoja, sillä niitä ei merkitty riittävän tarkasti. Mittauksessa ei tutkittu alustavassa lämpötilamittauksessa karakterisoituja SN37 ja SN45 transistoreja. Siksi ei voida tarkaan arvioida, kuinka paljon SN36 ja SN44 transistorien I_dV_d - ja I_dV_g käyrien muutokset johtuivat säteilytyksestä ja kuinka paljon uudelleen rakenettu mittausasetelma aiheutti muutoksia.

Saatuja tuloksia verrattiin ensimmäisen lämpötilamittauksen tuloksiin. Säteilytyksen havaittiin saaneen aikaan pitkäkestoisia muutoksia komponentissa. Muutosten suunta oli sama kuin säteilytyksen aiheuttama muutos.

4.5 Säteilytyksen pitkäaikaiset vaikutukset

Säteilytyksen pitkäaikaisia vaikutuksia komponenttiin haluttiin testata 62 päivää myöhemmin tekemällä lämpötilamittaus uudelleen SN36, SN37, SN44 ja SN45 komponenteille. Mittausasetelma pyrittiin jälleen kokoamaan mahdollisimman tarkasti samanlaiseksi kuin aikaisemmin.

Mittausta ei suoritettu loppuun saakka, sillä mittausten aikana havaittiin, että myös säteilyttämättömien SN37 ja SN45 komponenttien I_dV_d - ja I_dV_g kuvaajat olivat muuttuneet, kuten kuvista 4.3c ja 4.3d nähdään. Mittaustulosten pitäisi olla ajasta riippumattomia, koska mittausasetelma oli sama kuin aiemminkin ja näitä komponentteja ei oltu käsitelty millään tavalla mittausten välissä. Nyt mittauksissa havaittiin saman suuruusluokan eroavaisuuksia, kuin säteilytettyjen komponenttien SN36 ja SN44 vastaavissa kuvaajissa. Mahdollinen selitys voisi olla, että transistorin lämmittäminen -40 C° :sta 100 C° :een aiheuttaa pieniä muutoksia transistoreihin. Muutosten seurauksen transistorin kynnysjännite kasvaa. Hypoteesia ei ole testattu. Säteilytyksen pitkäaikaisia vaikutuksia ei tutkittu tämän tarkemmin.



Kuva 4.3: Neljän eri transistorin $I_d V_g$ -kuvaajat mitattuna $20^\circ C$ lämpötilassa. Transistoreja SN37 (4.3c) ja SN45 (4.3d) ei ole säteilytetty eikä käsitelty mitenkään lämpötilamittausten välissä.

5 Tulokset

Mittauksilla haluttiin selvittää miten energettiset elektronit vaikuttaa piikarbiditransistorien toimintaan. Ennakkoon oletettiin, että piikarbiditransistori hajoaisi normaalilla toiminta-alueella, kun se altistetaan riittävän voimakkaalle elektronisäteilylle. Hajoamistavan oletettiin olevan SEGR tai SEB. Näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan transistorit säilyivät toimintakuntoisina.

Tämän takia tutkin tarkemmin sitä, miten elektronisuihku kerryttää varausta transistoriin ja miten tämä varaus vaikuttaa transistorin toimintaan eri lämpötiloissa. Asiaa selvitettiin tutkimalla miten transistori siirtyy johtavaan tilaan eli miten sen kynnysjännite muuttuu.

5.1 Säteilytyksen vaikutus C2M1000170D-mallin piikarbiditransistoriin

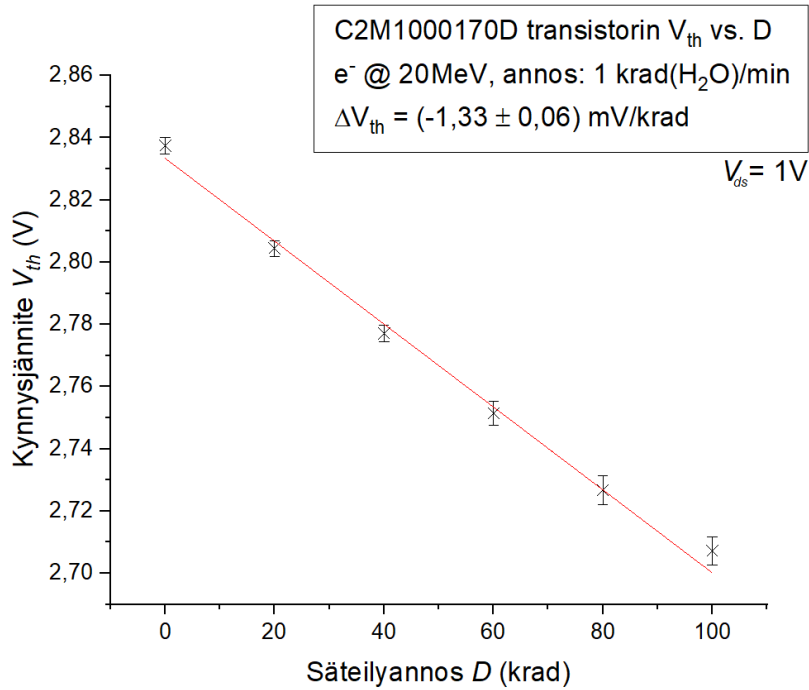
Kun C2M1000170D-mallin piikarbiditransistoria säteilytettiin sen kynnysjännitteen havaittiin pienenevän hieman jokaisen säteilyannoksen jälkeen. Transistorin kynnysjännitteet V_{th} määritettiin $\sqrt{I_d}V_g$ -kuvaajista. Kynnysjännitteen arvot sovitettiin samaan kuvaajaan säteilyannoksen D funktiona. Kynnysjännitteen arvojen sovitus on nähtävissä kuvassa 5.1. Pistejoukkoon sovitetun suoran kulmakertoimasta saatiin selville, että transistorin kynnysjännitteen muutos säteilyannoksen funktiona ΔV_{th}^{rad} oli

$$\Delta V_{th}^{rad} = (-0,00133 \pm 5,63 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{V}}{\text{krad}} \approx (-1,33 \pm 0,06) \frac{\text{mV}}{\text{krad}}.$$

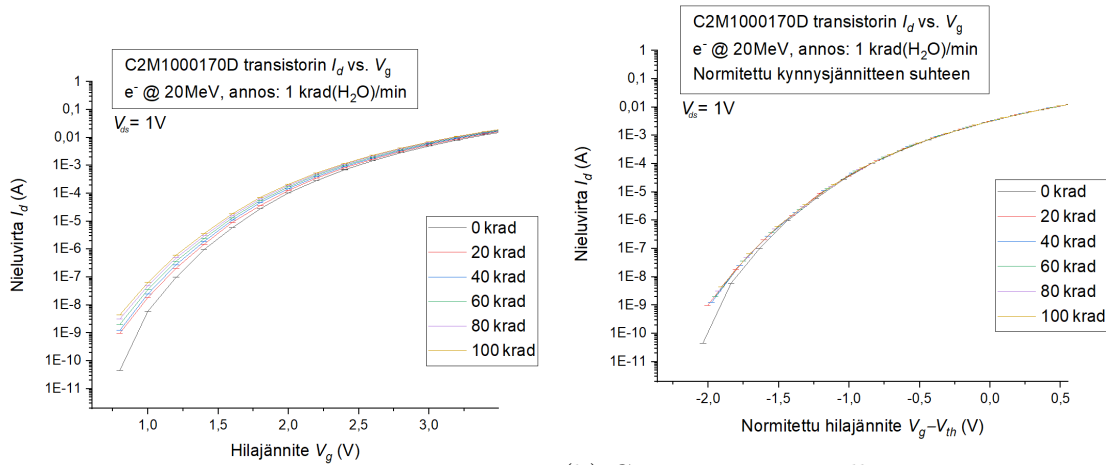
Mittauksesta voidaan todeta, että säteilytyksen alkuvaiheessa kynnysjännite pienenee lineaarisesti. Tulosten perusteella ei voida kuitenkaan olettaa, kuinka pitkälle kynnysjännitteen pienentyminen jatkuu. On olemassa tuloksia, joissa suurelle röntgensäteilyn annokselle altistuneen n-tyypin transistorin kynnysjännite ensin pienenee, mutta sitten alkaakin taas kasvamaan säteilyannoksen funktiona [35].

Kynnysjännitteen muutos johtuu hilaoksidein kertyvän varauksen V_{ot} ja hilaoksidin ja puolijohteen rajapintaan kertyvän varauksen V_{it} yhteisvaikutuksesta yhtälön (2.5) mukaisesti. Sitä, mihin varausta ensisijaisesti kertyi, arvioitiin sijoittamalla säteilytysten välissä mitatut $I_d V_g$ -pisteparit kuvaajaan 5.2a. Kun y-akselia tarkasteltiin logaritmisena, saatiin hyvin näkyviin se, miten virtakanava nieltä lähteelle aukeaa.

Kuvaajasta nähdään, että virtakanava nieltä lähteelle aukeaa hieman aikaisemmin, mitä enemmän transistoria on säteilytetty. Kuvaajassa näkyy siis kynnysjännitteen V_{th} pieneneminen säteilyannoksen funktiona. Lisäksi kuvaajasta nähdään, että

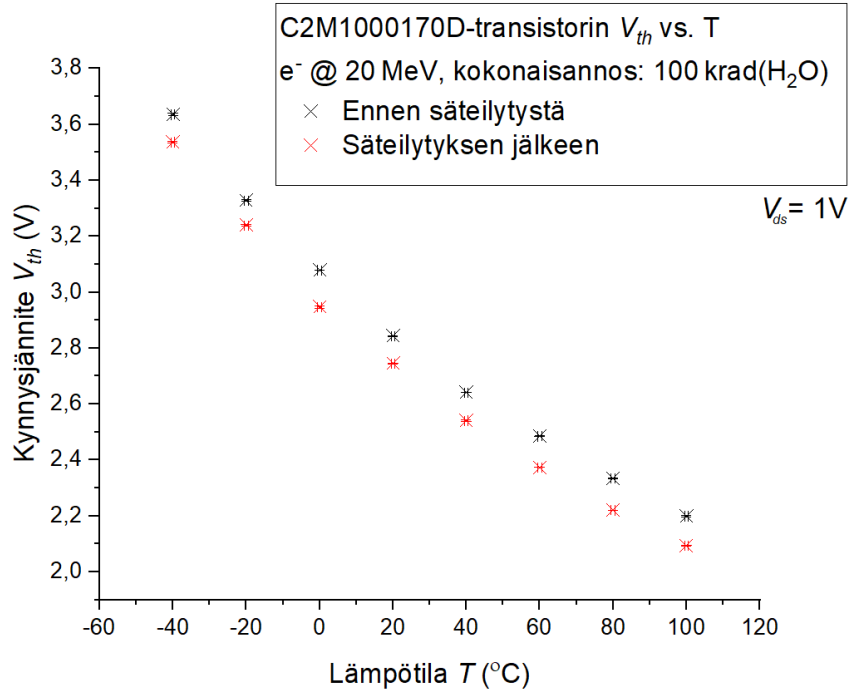


Kuva 5.1: C2M1000170D-mallin transistorin kynnysjännite V_{th} pieneni lähes lineaarisesti säteilyannoksen D funktiona.



(a) C2M1000170D-mallin transistorin $I_d V_g$ -pisteparit sovitettuna samaan kuvaajaan.
 (b) C2M1000170D-mallin transistorin $I_d V_g$ -pisteparit sovitettuna samaan kuvaajaan ja normitettuna kynnysjännitteeseen V_{th} suhteen.

Kuva 5.2: Kuvaajista 5.2a ja 5.2b voidaan nähdä, että säteilyttäessä kynnysjännite muuttuu, mutta kanava avautuu muuten samalla tavalla.



Kuva 5.3: Elektronisäteilytys ei ole juuri vaikuttanut C2M1000170D transistorin virtakanavan avautumiseen eri lämpötiloissa.

kanava näyttäisi aukeavan samalla tavalla, vaikka kynnysjännite pienenee. Tämä havainto tulee vielä selvemmin näkyviin kuvaajassa 5.2b, jossa kaikkien $I_d V_g$ -pisteparien käyrät on normitettu niiden kynnysjännitteiden avulla.

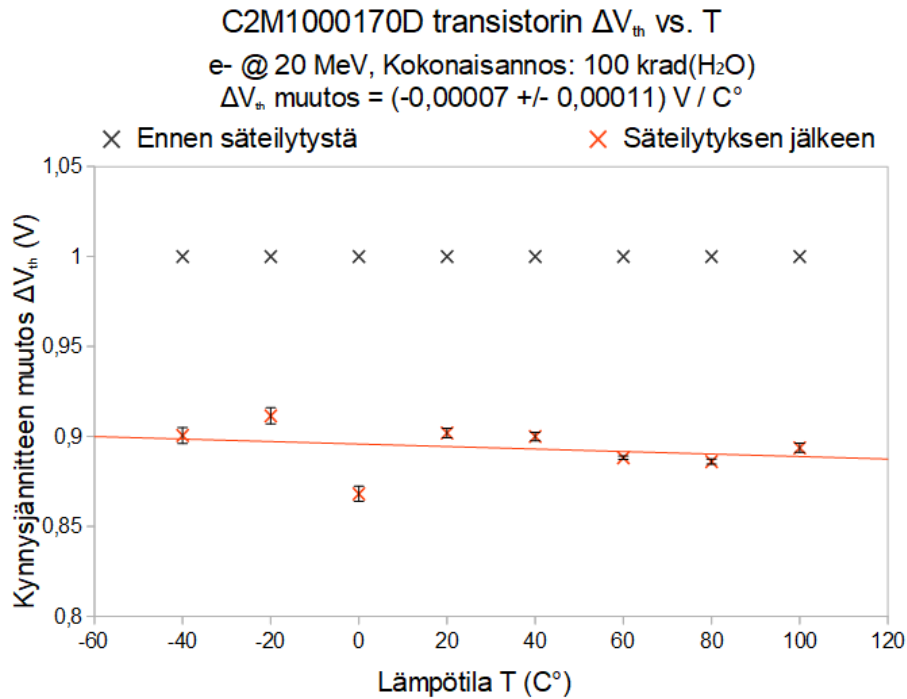
Tulokset antavat ymmärtää, että säteilytyksen alkuvaiheessa oksidivangittua varausta V_{ot} kertyy enemmän kuin rajapintaan loukkuuntunutta varausta V_{it} . Loukkuuntuvan varauksen V_{it} kertyminen vie yleensä enemmän aikaa.

Transistorille ei laskettu hilaoksiidiin kertyneen varauksen ΔV_{ot} muutosta. Kuvaajasta 5.2a nähdään hyvin, että säteilytysmittauksessa mittasin pistepareja varsin suurella välityksellä vuotovirran alueelta 1 pA–10 μ A. Alueelle jää vain viitisen pistettä. Virta ei myöskään selvästikkään pienene lineaarisesti logaritmisessa kuvaajassa, joten kynnysvirran ja midgap-virran välisen suoran linjaaminen olisi hyvin epätarkkaa.

C2M1000170D-mallin piikarbiditransistorin kynnysjännitteen muutosta lämpötilan funktiona mitattiin yhdelle komponentille ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen. Kynnysjännitteen muutos on esitetty graafisesti kuvaajassa 5.3.

Kuvaajasta nähdään, että säteilytys on pienentänyt transistorin kynnysjännitettä hieman. Kuvaajaan ei ole tehty kynnysjännitteen muutosnopeutta mittaavaa suoransovitusta, sillä pisteet eivät ole enää selkeästikkään suoralla. Kuvaajasta kuitenkin nähdään, että kynnysjännitteen muutos hidastuu lämpötilan kasvaessa. Tämä voidaan selittää perustransistorin yhtälöillä (2.3), missä vuotoviralla on eksponentiaalinen riippuvuus lämpötilasta (2.4). Lämpötilan kasvaessa transistori siirtyy yhä nopeammin johtavaan tilaan, jolloin kynnysjännitteiden välinen muutos on pienempi.

Kynnysjännitteen muutosta analysoitiin kuvaajan 5.4 avulla siten, että kaikki kyn-



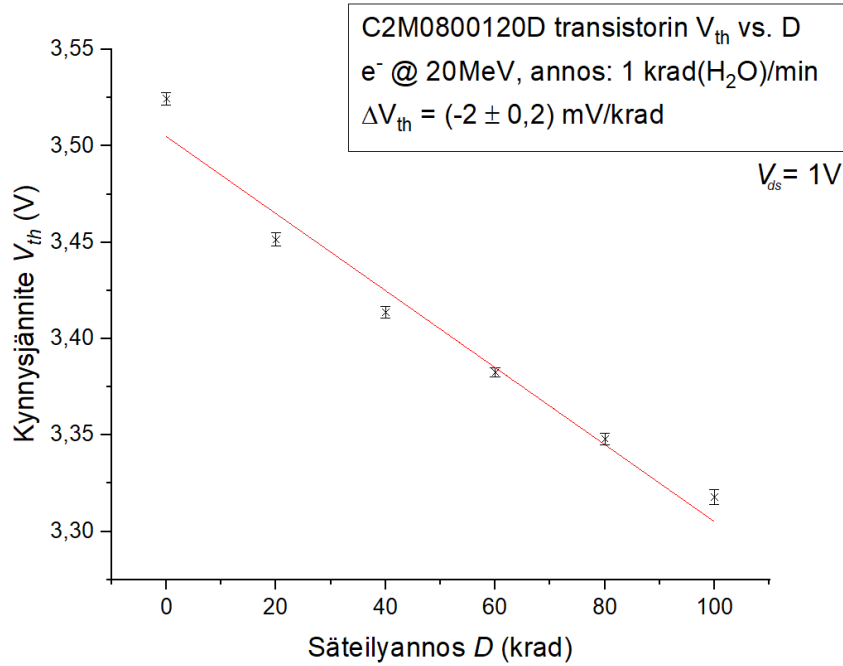
Kuva 5.4: Kaikki ennen säteilytystä mitatut kynnysjännitteen arvot on normitettu arvoon yksi. Säteilytyksen aiheuttama kynnysjännitteen muutos eri lämpötiloissa on laskettu ja sitä verrataan normitettuun kynnysjännitteeseen. Tähän pistejoukkoon sovitetun suoran kulmakerroin kertoo, että säteilyannoksella ei ole ollut mitattavaa vaikutusta kynnysjännitteen arvon muuttumiseen eri lämpötiloissa.

nysjännitteen arvot normalisoitiin arvoon yksi. Tällöin saatiin näkyviin onko säteilytyksellä ollut vaikutusta kynnysjännitteen arvoihin eri lämpötiloissa. Mittausdatan analyysin perusteella annetulla säteilyannoksella ei ole vaikutusta kynnysjännitteen arvon muuttumiseen eri lämpötiloissa virherajojen puitteissa.

Mittauksissa 0 C° lämpötilassa havaittiin säännöllisesti poikkeavuutta. Se ilmeni suurempana vuotovirtana ja hieman suurempana kynnysjännitteen siirtymänä. Nollan celsiusasteen lämpötila ei ole erityisesti merkittävä lämpötila tutkituissa transistoreissa käytettyille materiaaleille. Sen sijaan se on veden jäätymispiste, mikä viittaisi siihen, että mahdollinen ilmankosteuden jäätyminen, tiivistyminen tai sulaminen voisi aiheuttaa poikkeavuudet. Oletusta ei ole varmistettu mittauksilla.

Ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen tehdyt lämpötilamittaukset on tehty samoilla laitteilla, mutta mittauksessa käytetyistä kaapeleista ei pidetty tarkkaa lukua. Tästä on voinut aiheutua pientä systemaattista virhettä. Systemaattinen virhe vaikuttaa aina samaan suuntaan ja siksi se ei estä esimerkiksi kynnysjännitteen muutoksen ΔV_{th}^{rad} tutkimista [43].

Säteilyn pitkäaikaisia vaikutuksia mitattaessa havaittiin, että myös säteilyttämättömästä transistorista samassa olosuhteessa mitatun kahden virta-jännite-pisteparin välillä oli saman suuruusluokan absoluuttinen heitto, kun mitä säteilytys aiheutti.



Kuva 5.5: C2M080120D-mallin transistorin kynnysjännitteen V_{th} muutos absorboituneen säteilyannoksen funktiona.

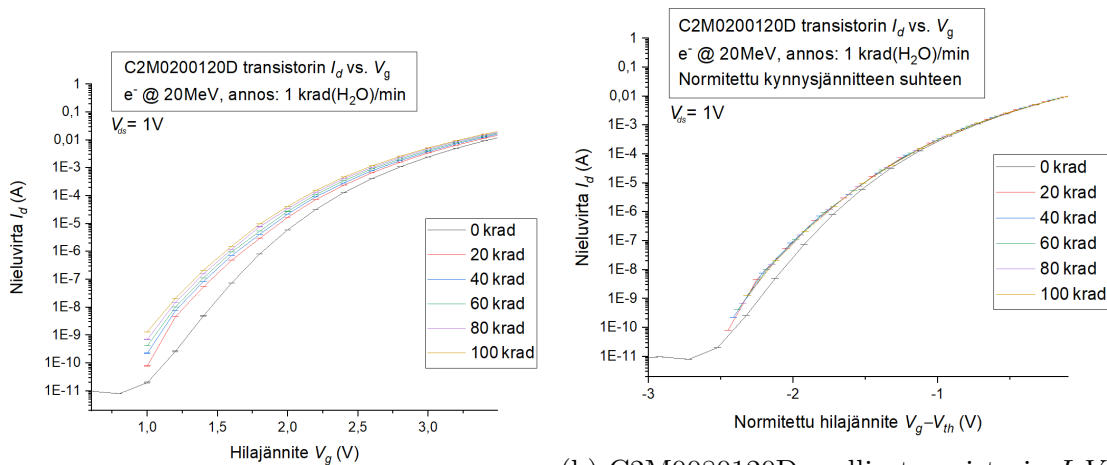
Tämä nähdään kuvaajissa 4.3c ja 4.3d. Ainoa asia, mikä tunnetusti muuttui mitausten välillä, oli käytetyt signaalikaapelit. Ilmiön voi kuitenkin selittää yhtä hyvin jokin transistorin palautumiseen liittyvä ominaisuus, joka ilmenee kun transistori on toimintarajojensa ääriarajoilla.

5.2 Säteilytyksen vaikutus C2M080120D mallin piikarbiditransistoriin

Kun C2M080120D-mallin piikarbiditransistoria säteilytettiin, havaittiin, että sen kynnysjännite pieneni hieman jokaisen säteilytysannoksen jälkeen. Transistorin kynnysjännitteet V_{th} määritettiin $\sqrt{I_d}V_g$ -kuvaajista. Kynnysjännitteen arvot sovitettiin samaan kuvaajaan säteilyannoksen D funktiona. Sovitus on nähtävissä kuvassa 5.5. Pistejoukkoon sovitetun suoran kulmakertoimesta saatiin selville, että transistorin kynnysjännitteen muutos säteilyannoksen funktiona ΔV_{th}^{rad} on

$$\Delta V_{th}^{rad} = (-2,00 \pm 0,18) \frac{\text{mV}}{\text{krad}} \approx (-2,0 \pm 0,2) \frac{\text{mV}}{\text{krad}}.$$

Tuloksista voidaan todeta, että säteilytettäessä transistorin kynnysjännite pienentyi lähes lineaarisesti. Sitä kuinka pitkään kynnysjännite säteilyannoksen funktiona pienenee ei voida päätellä, kuten ensimmäisen transistorin tuloksia käsitellessä perusteltiin.



(a) C2M0080120D-mallin transistorin $I_d V_g$ -pisteparit sovitettuna samaan kuvaajaan. (b) C2M0080120D-mallin transistorin $I_d V_g$ -pisteparit sovitettuna samaan kuvaajaan ja normitettuna kynnysjännitteen V_{th} suhteen.

Kuva 5.6: Kuvaajista 5.6a ja 5.6b nähdään, että transistorin kynnysjännite pienenee säteilytettäessä.

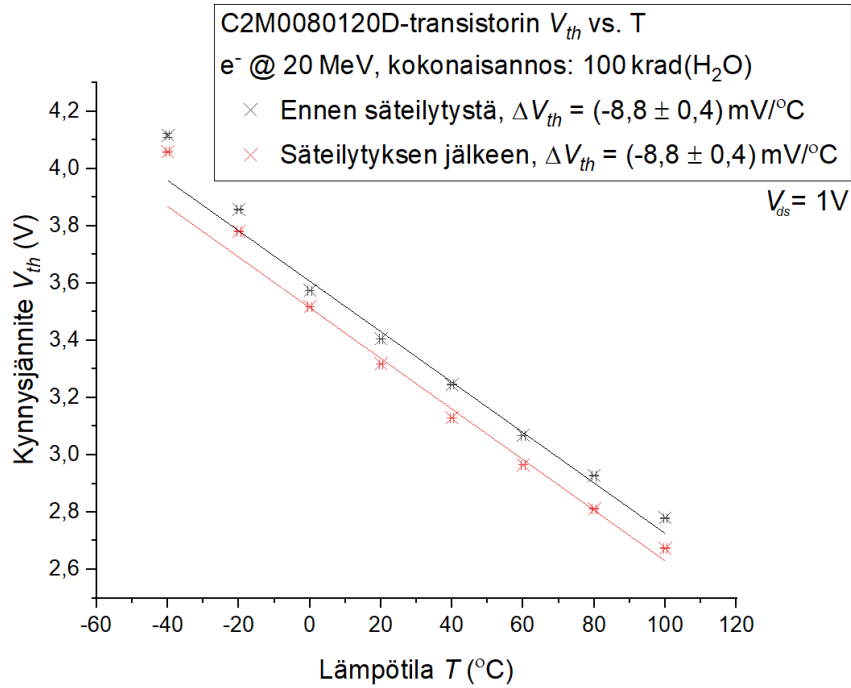
Kynnysjännitteen muutoksen aiheuttavien varausten V_{ot} ja V_{it} kertymistä arvioidaan jälleen sijoittamalla säteilytysten välissä mitatut $I_d V_g$ -pisteparit kuvaajaan 5.6a. Kuvaajasta nähdään kynnysjännitteen V_{th} pieneneminen säteilyannoksen funktiona. Lisäksi kuvaajasta nähdään, että kanava näyttäisi aukeavan samalla tavalla, vaikka kynnysjännite pienenee. Tämä havainto tulee vielä selvemmin näkyviin kuvaajassa 5.2b, jossa kaikkien $I_d V_g$ -pisteparien käyrät on normitettu niiden kynnysjännitteiden avulla. Tulokset antavat ymmärtää, että tälläkin transistorilla säteilytyksen alkuvaiheessa oksidivangittua varausta V_{ot} kertyy enemmän, kuin rajapintaan loukkuuntuvaa varausta V_{it} .

Kuvaajissa 5.6a ja 5.6b nousee esiin säteilyttämättömän transistorin selkeästi poikkeava avautuminen. Tässä mittauksessa myös nieluvirta oli alusta lähtien positiivista. Muissa mittauksissa kanava vuotovirta on ollut negatiivista, kun hilajännitteen arvo on ollut alle yhden voltin. Ilmiön selittämiseksi tarkemmin tulisi kuitenkin tehdä vastaava mittaus useammalla C2M0800120D-mallin transistorilla.

Myöskään tälle transistorille ei laskettu hilaoksidein kertyneen varauksen ΔV_{ot} muutosta midgap-menetelmällä. Syyt ovat samat kuin ensimmäisen transistorin tapauksessa, minkä takia kynnysvirran ja midgap-virran välisen suoran linjaaminen olisi hyvin epätarkkaa.

C2M0080120D-mallin piikarbiditransistorin kynnysjännitteen muutosta lämpötilan funktiona mitattiin yhdellä komponentilla ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen. Kynnysjännite selvitetiin graafisesti $I_d V_g$ kuvaajasta. Tulokset on nähtävissä kuvaajassa 5.7.

Kuvaajasta nähdään, että säteilytys on pienentänyt transistorin kynnysjännitettä hieman. Säteilytys ei ole kuitenkaan vaikuttanut siihen, kuinka nopeasti kynnysjänni-



Kuva 5.7: C2M0080120D-mallin piikarbiditransistorin kynnysjännitteen muutos lämpötilan funktiona ennen säteilytystä ja sen jälkeen.

nite muuttuu lämpötilan funktiona. Kuvaajaan sovitetun suoran avulla kynnysjännitteen muutosnopeus ennen säteilytystä ΔV_{th}^{pre} ja säteilytyksen jälkeen ΔV_{th}^{post} olivat virherajojen puitteissa yhtä suuret.

$$\Delta V_{th}^{pre} = (-0,00881 \pm 0,00405) \frac{V}{C^\circ} \approx (-8,8 \pm 0,4) \frac{mV}{C^\circ} \quad (5.1)$$

$$\Delta V_{th}^{post} = (-0,00884 \pm 0,00368) \frac{V}{C^\circ} \approx (-8,8 \pm 0,4) \frac{mV}{C^\circ} \quad (5.2)$$

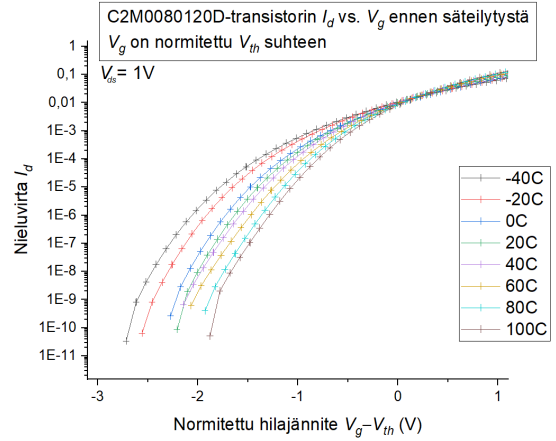
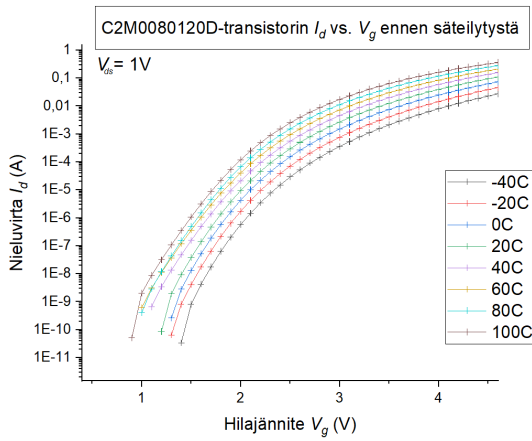
Myös näissä mittauksissa $0\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa ilmeni säännöllisesti poikkeavuuksia, mikä saattoi johtua ilmankosteuden olomuodonmuutoksista. Tämä ilmeni suurempana vuotovirtana ja hieman suurempana kynnysjännitteen siirtymänä. Koska poikkeavuuden syytä ei ole varmistettu, myös $0\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa tehdyt mittaukset on huomioitu kynnysjännitteen muutosta lämpötilan funktiona laskettaessa yhtälöissä (5.1) ja (5.2). Tein kuitenkin myös sovituksen, jossa ongelmalliset pisteet jätettiin huomiotta, mutta myös tällöin ΔV_{th}^{pre} ja ΔV_{th}^{post} olivat yhtäsuuret virherajojen puitteissa.

Kuvaajasta 5.7 näkee myös, että kynnysjännitteen muutos ei ole lineaarista, vaan muutos hidastuu lämpötilan kasvaessa. Tutkitulla lämpötilavälillä ilmiö on kuitenkin niin vähäinen, että muutosnopeuden laskeminen suoran avulla antaa pisteiden väliselle korrelaatiolle r arvon $r > 0,985$, mikä on hyväksyttävä [43]. Tulosta ei voida yleistää mittausalueen ulkopuolelle.

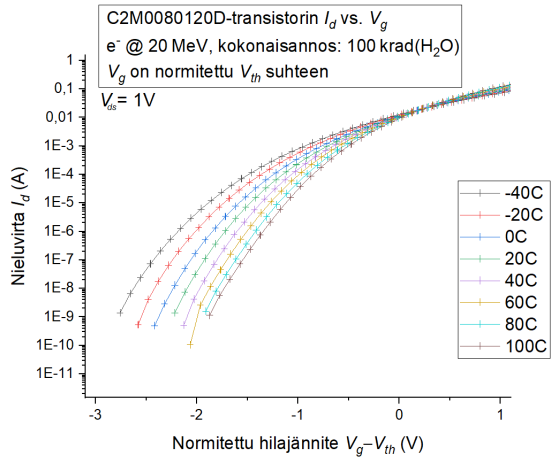
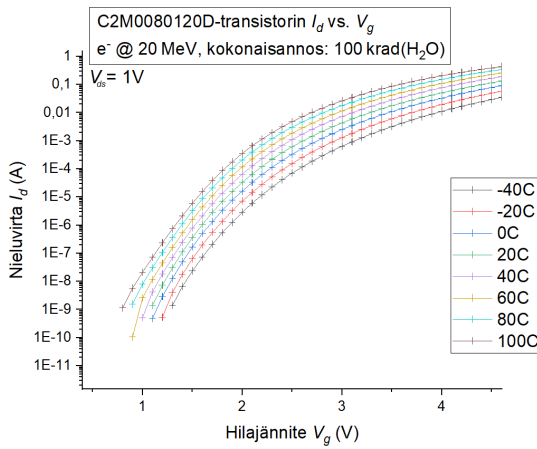
Kynnysjännitteen lievä epälineaarinen muutos nähdään paremmin, kun transistorin eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit sijoitetaan samaan kuvaajaan ja pistejoukot

normitetaan kynnysjännitteen suhteen. Ennen säteilytystä eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit ovat kuvaajassa 5.8a ja kynnysjännitteen suhteen normitettuna ne ovat kuvaajassa 5.8b.

Transistorin vuotovirran yhtälö (2.3) ennustaa, että transistorin vuotovirta kasvaa lämpötilan noustessa (2.4). Ilmiö nähdään hyvin, kun lämpötilamittauksen normitetusta kuvaajaasta 5.8b, missä lämpötilan noustessa vuotovirran kuvaaja nousee yhä jyrkemmin. Ilmiö toistuu samalla tavalla myös säteilytyksen jälkeen tehdyistä lämpötilamittauksista mitatuista $I_d V_g$ -pistepareista muodostetuissa kuvaajissa 5.8c ja 5.8d. Säteilyn pitkäaikaisia vaikutuksia ei ole mitattu tarkasti myöskään tälle transistorille. Syynä ovat jo edellä mainittut mittauksissa ilmenneet epäjohdonmukaisuudet.



(a) Ennen säteilytystä eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit. (b) Ennen säteilytystä eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit normitettuna kynnsjännitteen V_{th} suhteen.



(c) Säteilytyksen jälkeen eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit. (d) Säteilytyksen jälkeen eri lämpötiloissa mitatut $I_d V_g$ -pisteparit normitettuna kynnsjännitteen V_{th} suhteen.

Kuva 5.8: Kuvissa on C2M0080120D-transistorin nieluvirran muutos hilajännitteen funktiona eri lämpötiloissa ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen.

6 Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin, miten energettiset elektronit vaikuttavat piikarbidista valmistettuihin N-tyypin MOSFET-transistoreihin. Tutkittavana olivat Wolfspeedin valmistamat C2M0080120D 1200-V SiC ja C2M1000170D 1700-V SiC –tehotransistorit. Tutkimuksen tärkein tulos oli, etteivät energettiset elektronit aiheuta välitöntä vaaraa piikarbidipohjaisille tehotransistoreille.

Kaikki testatut transistorit selvisivät toimintakuntoisina 20 MeV elektronipommituksesta säteilyannoksen ollessa 1000 rad(H₂O)/min. Säteilystä transistoreiden kynnysjännitteen havaittiin kuitenkin pienentyneen. C2M0080120D-transistorin kynnysjännite muuttui säteilytettäessä ($-2,0 \pm 0,2$) mV/krad ja C2M1000170D-transistorille muutos oli ($-1,33 \pm 0,06$) mV/krad.

Mitä enemmän transistoreja säteilytettiin, sitä enemmän niiden kynnysjännite pieneni. Tämä johtuu transistorin hilaoksidiin loukkuuntuneista aukoista. Sitä, kuinka pitkään säteilytyksen vaikutukset säilyvät transistoreissa, ei tämän tutkimuksen perusteella pystytä arvioimaan. Vaikutukset oli kuitenkin havaittavissa vielä useita päiviä säteilytyksen jälkeen.

Transistorien kynnysjännitteen muutosta lämpötilan suhteen tutkittiin ennen säteilytystä ja säteilytyksen jälkeen. Mittaukset tehtiin kahdelle komponentille, jotka olivat eri mallisia. Tuloksista havaittiin, ettei kynnysjännitteen lämpötilariippuvuus muuttunut säteilytyksen vaikutuksesta.

Tutkimuksen tulosten perusteella avaruuteen lähetettävien piikarbiditransistorien säteilyn kestävyyttä on riittävä jatkossakin testata vain ionien avulla, eikä niiden elektronisäteilyn kestävyyttä tarvitse testata erikseen. Avaruudessa lähes kaikkialla, missä on energettisiä elektroneja, on myös energettisiä ioneita. Jos piikarbiditransistori kestää energettisiä ioneita, se hyvin todennäköisesti kestää myös energettisiä elektroneja. Harvoja poikkeuksia ovat tietyt vyöhykkeet planeettojen magneettikentissä, missä voi esiintyä pääasiassa energettisiä elektroneja.

Energeettisemmällä elektroneilla saattaa olla poikkeava vaikutus piikarbiditransistoreihin. Jatkotutkimusta voisi tehdä siitä, miten 100 MeV elektronisäteily vaikuttaa tehotransistoriin. Tällainen säteily-ympäristö on mahdollista löytää Jupiterin magneettikentästä.

Jatkotutkimusta voisi tehdä myös siitä, miten piikarbiditransistorin kynnysjännitteen muutokseen elektronisäteilytyksessä vaikuttaa transistorien tekniset ominaisuudet ja vastaavatko ne perinteisille puolijohdekomponenteille tehtyjen säteilymittausten tuloksia. Tulosten avulla valmistajat voisivat suunnitella entistä vakaampia transistoreita, joiden kynnysjännitteet muuttuisivat mahdollisimman vähän pitkäkestoisen elektronisäteilyn vaikutuksesta. Tämä edellyttää, että tutkittavasta transistorista on saatavilla tarkat tiedot sen virtakanavan rakenteesta, leveydestä ja pituudesta ja piikarbidisiin rikastettujen atomien lukumäärästä.

Myös suuremman säteilyannoksen vaikutuksia voitaisiin vielä tutkia. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että piitransistorin kynnysjännitteen muutos säteilyannoksen kasvaessa ei ole lineaarista. Tämänkin tutkimuksen toteuttaminen vaatii tarkat tekniset tiedot tutkittavista komponenteista ja lisäksi paljon kiihdytinaikaa, mikä on kallista. Tutkimuksen avulla voitaisiin löytää piikarbiditransistorin rakenne, jossa sen kynnysjännite pysyy mahdollisimman pitkään lähellä alkuperäistä arvoa.

Kirjallisuutta

- [1] O. Adriani ym. Cosmic-ray positron energy spectrum measured by pameła. *Phys. Rev. Lett.*, 111:081102, Aug 2013. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.081102>.
- [2] A. Akturk, R. Wilkins, J. McGarrity ja B. Gersey. Single event effects in si and sic power mosfets due to terrestrial neutrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 64(1):529–535, Jan 2017.
- [3] J. A. V. Allen, C. E. McIlwain ja G. H. Ludwig. Satellite observations of electrons artificially injected into the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 45(8):1152–1171, 1959. URL: <http://www.pnas.org/content/45/8/1152>.
- [4] N. Arora. *Mosfet Modeling For Vlsi Simulation: Theory And Practice.*, sarjassa *International Series on Advances in Solid State Electronics and Technology*. International Series on Advances in Solid State Electronics and Technology. World Scientific, 2007. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=203861&site=ehost-live>.
- [5] D. N. Baker, S. G. Kanekal, V. C. Hoxie, M. G. Henderson, X. Li, H. E. Spence, S. R. Elkington, R. H. W. Friedel, J. Goldstein, M. K. Hudson, G. D. Reeves, R. M. Thorne, C. A. Kletzing, ja S. G. Claudepierre. A long-lived relativistic electron storage ring embedded in earth’s outer van allen belt. *Science*, 340(6129):186–190, 2013. URL: <http://science.sciencemag.org/content/340/6129/186>.
- [6] J. B. Baliga. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer US, 2008.
- [7] J. M. Benedetto ja H. E. Boesch. The relationship between 60co and 10-kev x-ray damage in mos devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 33(6):1317–1323, Dec 1986.
- [8] A. B. Bhattacharyya. *Semiconductor Physics Review for MOSFET Modeling*, ss. 512–. Wiley-IEEE Press, 2009. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5681179>.
- [9] E. Chaisson ja . McMillan, S. (Stephen). *Astronomy today*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall ; London : Prentice Hall International, kolmas laitos, 1999. Previous ed.: 1997.

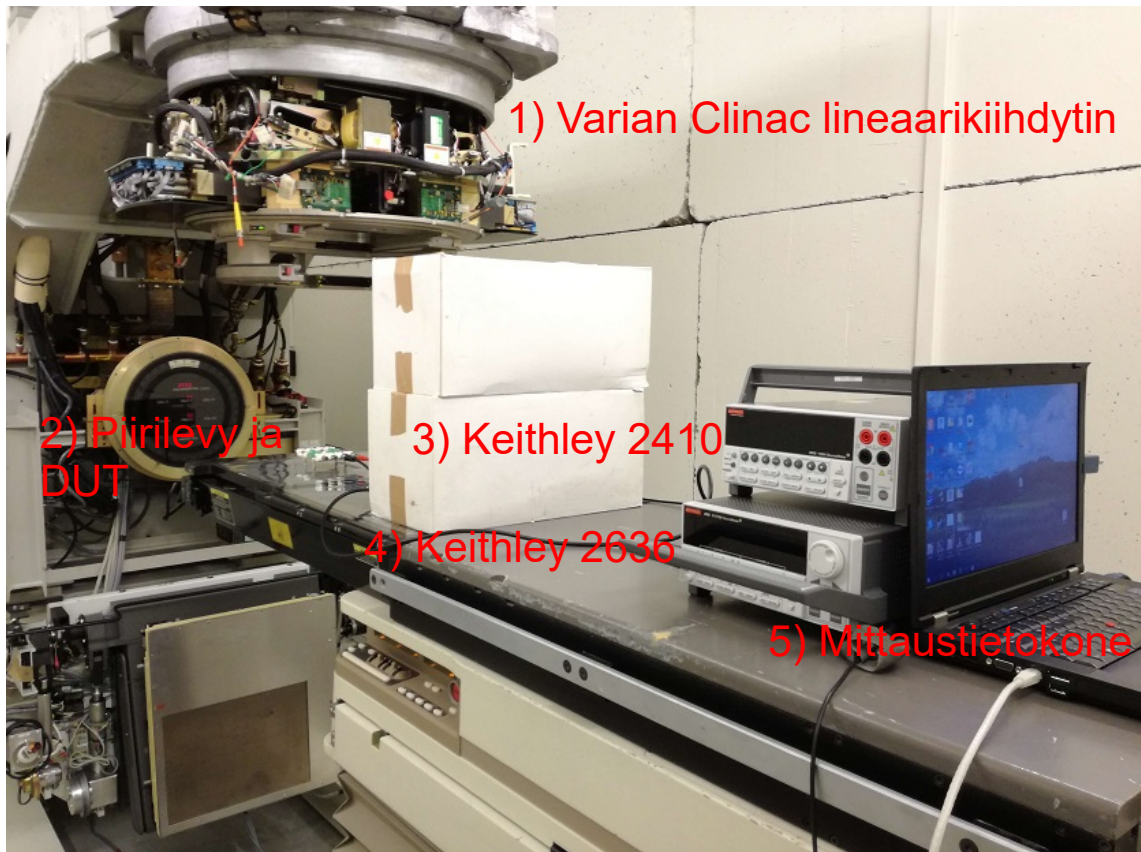
- [10] B. I. des Poids et Mesures. *Updates to the International System of Units (SI), brochure (8th edition)*. STEDI MEDIA, Paris, 2008. URL: <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [11] R. DiBari. What reliability engineers should know about space radiation effects. *Kirjassa 2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, ss. 1–2, Jan 2013.
- [12] G. R. Fisher ja P. Barnes. Towards a unified view of polytypism in silicon carbide. *Philosophical Magazine Part B*, 61(2):217–236, 1990. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/13642819008205522>.
- [13] D. J. Griffiths. *Introduction to quantum mechanics*. Pearson Education Limited, Upper Saddle River, NJ, second edition laitos, 2013. Pearson Education International., URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1418298>.
- [14] W. Hess. *The Radiation Belt and Magnetosphere*, sarjassa *Blaisdell book in the pure and applied sciences*. Blaisdell Publishing Company, 1968. URL: <https://books.google.fi/books?id=BCZRAAAAMAAJ>.
- [15] C. Hu. *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits*. Prentice Hall, 2010. URL: <https://books.google.fi/books?id=PosRbWdafnsC>.
- [16] D. John Bird, S. Corbato, H. Dai, J. Elbert, K. Green, M.-H. Huang, D. Kieda, S. Ko, C. Larsen, ja E. Loh. Detection of a cosmic ray with measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to cosmic microwave radiation. *The Astrophysical Journal*, 441:144–150, 03 1995.
- [17] J. Lauenstein, R. L. Ladbury, N. Goldsman, H. S. Kim, D. A. Batchelor ja A. M. Phan. Interpreting space-mission let requirements for segr in power mosfets. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(6):3443–3449, Dec 2010.
- [18] C. Leroy ja P.-G. Rancoita. *Principles Of Radiation Interaction In Matter And Detection (3rd Edition)*., osa 3rd ed. World Scientific, 2012. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=426450&site=ehost-live>.
- [19] T. Ma ja P. Dressendorfer. *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*, sarjassa *A Wiley-Interscience publication*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1989. URL: <https://books.google.fi/books?id=Z6jyidJL7Q8C>.
- [20] Materials scientist. 2h-sic structure with stacking sequence marked, luettu 12.09.2017. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27407647t>.
- [21] R. McGuire ja T. von Rosenvinge. The energy spectra of solar energetic particles. *Advances in Space Research*, 4(2):117 – 125, 1984. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273117784903016>.

- [22] P. J. McWhorter ja P. S. Winokur. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors. *Applied Physics Letters*, 48(2):133–135, 1986. URL: <https://doi.org/10.1063/1.96974>.
- [23] M. Mehregany, C. A. Zorman, N. Rajan ja C. H. Wu. Silicon carbide mems for harsh environments. *Proceedings of the IEEE*, 86(8):1594–1609, Aug 1998.
- [24] D. Müller. Cosmic-ray electrons and positrons. *Advances in Space Research*, 27(4):659 – 668, 2001. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117701001077>.
- [25] H. Morkoç, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov ja M. Burns. Large-band-gap sic, iii-v nitride, and ii-vi znse-based semiconductor device technologies. *Journal of Applied Physics*, 76(3):1363–1398, 1994. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.358463>.
- [26] NASA. Summary report of the review of u.s. human space flight plans committee, 2009. URL: https://www.nasa.gov/offices/hsf/related_documents/summary_report.html.
- [27] NASA. Review of nasa’s acquisition of commercial launch services, 2011.
- [28] NASA. Engineers diagnosing voyager 2 data system, luettu 29.06.2018. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/voyager20100506.html.
- [29] National Research Council, (U.S.). *Gravitation, Cosmology, and Cosmic-ray Physics.*, sarjassa *Physics Through the 1990s*. Physics Through the 1990s. National Academies Press, 1986. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=123885&site=ehost-live>.
- [30] N. F. Ness, M. H. Acuna, R. P. Lepping, L. F. Burlaga, K. W. Behannon ja F. M. Neubauer. Magnetic field studies at jupiter by voyager 2: Preliminary results. *Science*, 206(4421):966–972, 1979. URL: <http://science.sciencemag.org/content/206/4421/966>.
- [31] H. Nevanlinna. A study on the great geomagnetic storm of 1859: Comparisons with other storms in the 19th century. *Advances in Space Research*, 38(2):180 – 187, 2006. The Great Historical Geomagnetic Storm of 1859: A Modern Look, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117705010227>.
- [32] T. R. Oldham ja F. B. McLean. Total ionizing dose effects in mos oxides and devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(3):483–499, June 2003.
- [33] E. Petersen. *Single event effects in aerospace*. IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 2011. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/bkabstractplus.jsp?bkn=6047596>.

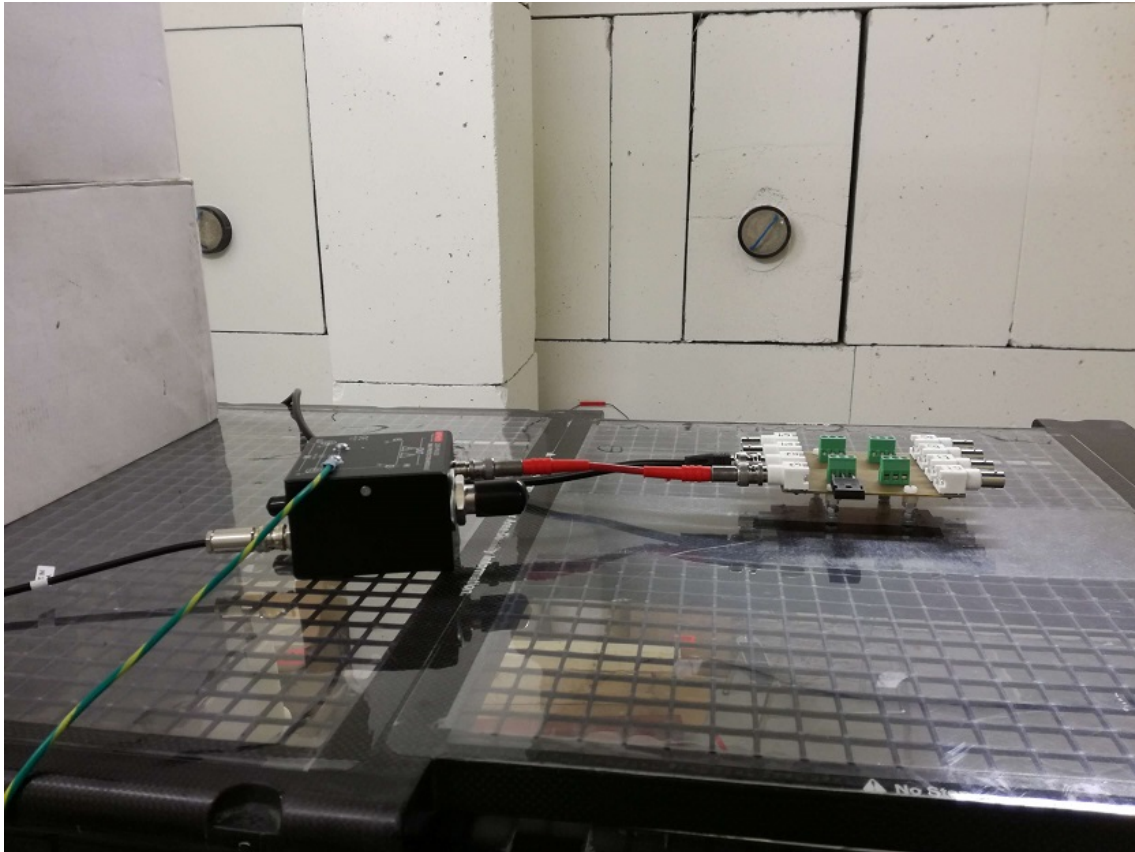
- [34] L. Z. Scheick. Recent power mosfet single event testing results. Kirjassa *2012 IEEE Radiation Effects Data Workshop*, ss. 1–9, July 2012.
- [35] M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, J. R. Schwank ja T. L. Meisenheimer. Effects of device scaling and geometry on mos radiation hardness assurance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 40(6):1678–1685, Dec 1993.
- [36] T. L. Shu. *Spacecraft Charging*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=3111693>.
- [37] J. A. Simpson. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 33(1):323–382, 1983. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.ns.33.120183.001543>.
- [38] O. Sokolsky, M. Younis, I. Lee, H.-H. Kwak ja J. Zhou. Verification of the redundancy management system for space launch vehicle: a case study. Kirjassa *Proceedings. Fourth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium (Cat. No.98TB100245)*, ss. 220–229, June 1998.
- [39] Standard Wire & Cable Co. Coaxial cable, theory and application, viitattu 19.10.2017. URL: http://www.standard-wire.com/coax_cable_theory_and_application.html.
- [40] Säteilyturvakeskus. Aiheet – kodin ja toimiston säteilevät lähteet, luettu 17.8.2017. URL: <http://www.stuk.fi/aiheet/kodin-ja-toimiston-sateilevat-laitteet>.
- [41] Säteilyturvakeskus. Aiheet – säteily ympäristössä – luonnon taustasäteily, luettu 21.6.2018. URL: <http://www.stuk.fi/aiheet/sateily-ymparistossa/luonnon-taustasateily>.
- [42] D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker ja M.-G. Schulz. *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*. American Geophysical Union, 2013.
- [43] J. Taylor. *Introduction To Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, sarjassa *A series of books in physics*. A series of books in physics. University Science Books, 1997. URL: <https://books.google.fi/books?id=giFQcZub80oC>.
- [44] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation*, osa 1. United Nations Publications, 2008.
- [45] O. K. W., S. J. D. ja S. M. Electron energy flux in the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 76(34):8165–8173, 1971. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA076i034p08165>.

- [46] J. W. Warwick, D. R. Evans, J. H. Romig, C. B. Sawyer, M. D. Desch, M. L. Kaiser, J. K. Alexander, T. D. Carr, D. H. Staelin, S. Gulkis, R. L. Poynter, M. Aubier, A. Boischot, Y. Leblanc, A. Lecacheux, B. M. Pedersen, ja P. Zarka. Voyager 2 radio observations of uranus. *Science*, 233(4759):102–106, 1986. URL: <http://science.sciencemag.org/content/233/4759/102>.
- [47] Weissttechnik. *Manual: Climate Test Chamber, System Weiss Type, WK3-180/40*, viitattu, 10.10.2017. URL: <https://www.buch-holm.dk/Perfion/File.aspx?id=27d0dbc4-7742-431f-a4e9-440ac2a23437>.
- [48] A. F. Witulski, D. R. Ball, K. F. Galloway, A. Javanainen, J. Lauenstein, A. L. Sternberg ja R. D. Schrimpf. Single-event burnout mechanisms in sic power mosfets. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 65(8):1951–1955, Aug 2018.
- [49] Wolfspeed. *Datasheet: C2M1000170D, Silicon Carbide Power Mosfet, C2M MOSFET Technology, N-Channel Enhancement Mode*, viitattu, 11.10.2017. URL: <http://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/173/product/13/c2m1000170d.pdf>.
- [50] Wolfspeed. *Datasheet: C2M0080120D, Silicon Carbide Power Mosfet, C2M MOSFET Technology, N-Channel Enhancement Mode*. Cree, Inc, viitattu, 11.10.2017. URL: <http://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/167/product/10/c2m0080120d.pdf>.
- [51] H. D. Young ja R. A. Freedman. *University Physics With Modern Physics, 11th Edition*. Pearson, 2004.

A Kuvat mittausasetelmista



Kuva A.1: Kuva säteilytysmittauksen mittausasetelmasta. Edessä oikealla mittausta ohjaava tietokone (5) ja Keithleyn mittarit (3–4). Parafiiniharkkojen takaa näkee piirilevyn (2) ja taustalla lineaarikiihdyttimen (1).



Kuva A.2: Keithley 2290-PM-200 -suojamoduuli, josta lähtee punainen SHV/BNC-adapterikaapeli, vihreä-keltainen suojamaa johto ja musta triaxial-kaapeli. Piirilevystä lähtevä toinen BNC-kaapeli on yhteydessä suoraan Keithley 2410 -mittalaitteeseen.