Tampereen yliopisto

Susanna Rouru

III–V-AURINKOKENNOJEN RAPPEUTUMINEN AVARUUDEN SÄTEILYN VAIKUTUKSESTA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: TkT Arto Aho
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Susanna Rouru: III–V-aurinkokennojen rappeutuminen avaruuden säteilyn vaikutuksesta
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Avaruuden säteily vaurioittaa elektroniikkaa avaruusmissioilla lyhentäen niiden elinikää. Tämä on ongelma myös avaruusaurinkokennoille, jotka ovat Maata kiertävien satelliittien pääteholähde. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan avaruusaurinkokennojen rappeutumista sekä teorian pohjalta, että kokeellisen tutkimuksen kannalta.

Työssä käsitellyt avaruusaurinkokennoprototyypit ovat InGaP/GaAs/InGaNAs-moniliitosaurinkokennoja. Tällaisten puolijohdeaurinkokennojen toiminta perustuu olennaisesti niiden energiavyörakenteeseen. Materiaalien periodinen kiderakenne vuorostaan vaikuttaa energiatiloihin. III–V-puolijohdeaurinkokennoissa merkittävin säteilyn aiheuttama vauriotyyppi onkin protonien ja elektronien aiheuttamat kiderakenteen muutokset. Häiriöt periodisessa kiderakenteessa synnyttävät uusia energiatiloja, jotka vaikuttavat negatiivisesti muun muassa varauksenkuljettajien liikkuvuuteen. Tästä seuraa kennon sähköisten ominaisuuksien huononemista.

Aurinkokennoille haitallista energeettistä protoni- ja elektronisäteilyä esiintyy avaruudessa merkittäviä määriä. Maapalloa kiertävät satelliitit altistuvat Maan magneettikenttään loukkuuntuneille varauksellisille hiukkasille. Toisaalta Maan magneettikenttä suojaa alemmilla kiertoradoilla kulkevia satelliittejä Auringosta lähtöisin olevalta energeettiseltä hiukkassäteilyltä. Planeettojen välisillä avaruusmissioilla nämä auringonpurkauksista ja koronan massapurkauksista aiheutuvat hiukkasvuot ovat suurin säteilyongelma aurinkokennoille.

Avaruuden säteilyalueiden monimuotoisuuden takia myös niiden vaurioitumisen ennakointi on haastavaa. Tämän kandidaatintyön toisessa osassa käsitellään joitakin aurinkokennojen rappeutumiseen liittyviä yleisiä tutkimusmenetelmiä. Huomataan, että uusien aurinkokennotyyppien säteilynkestävyyden tarkka tutkimus vaatii monenlaisia resursseja niin mittauslaitteistojen kuin analysointityökalujen osalta.

Tämän työn kokeellista osaa varten III–V-moniliitosaurinkokennoille tehtiin virta–jännite-mittauksia niiden sähköisten ominaisuuksien tutkimiseksi Tampereen yliopiston Optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa (ORC). Kun 1 MeV elektroneilla säteilytettyjä aurinkokennoja valaistiin aurinkosimulaattorilla, havaittiin selvästi kennojen tehon heikkenemistä. $1 \cdot 10^{15}$ e/cm säteilyannoksen jälkeen kennojen hyötysuhde oli laskenut 26,5 %:sta 18,4 %:iin. Kaupallisiin avaruusaurinkokennoihin vertailtaessa huomataan, että tässä työssä tutkittujen kennojen säteilynkestävyys ei ole aivan yhtä hyvä kuin kaupallisten moniliitoskennojen. Tämä käy järkeen, sillä tutkitut kennot ovat vasta prototyyppejä, eikä niissä ole hyödynnetty säteilyä jarruttavaa suojalasia. Kennoprototyypit osoittautuvat kuitenkin paljon piistä valmistettuja avaruusaurinkokennoja paremmiksi, mikä lupaa hyvää.

Avainsanat: kennot, aurinkokennot, avaruusaurinkokennot, III–V-moniliitosaurinkokennot, avaruus, säteily, degradaatio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto . . . 1
2. Fysikaalinen perusta . . . 3
2.1 Aurinkokennojen fysiikka . . . 3
2.1.1 Puolijohteiden kiderakenne . . . 3
2.1.2 Pn-liitos . . . 4
2.1.3 Aurinkokennojen sähköiset toimintaperiaatteet . . . 6
2.1.4 III–V-moniliitosaurinkokennojen rakenne . . . 7
2.2 Säteilyn vaikutukset elektroniikkaan avaruudessa . . . 8
2.2.1 Tyypilliset vauriomekanismit . . . 8
2.2.2 Kiderakenteen muutokset . . . 8
2.2.3 Kidevirheiden vaikutukset III–V-aurinkokennoihin . . . 9
2.2.4 Kiderakenteen vaurioiden pysyvyys . . . 10
2.3 Säteilytyypit avaruudessa . . . 11
2.3.1 Maan säteilyvyöhykkeet . . . 12
2.3.2 Maan kiertoradat . . . 13
3. Ilmiöön liittyvä tutkimus . . . 14
3.1 Standardeja . . . 14
3.2 Laskennallisia työkaluja rappeutumisanalyysille . . . 14
3.3 Analyysiohjelmistoja ja säteilyvaurioanalyysi . . . 16
4. Mittaukset ja tulosten analysointi . . . 17
4.1 Säteilytetyjen aurinkokennojen mittaukset . . . 17
4.2 Mittausdatan analysointi . . . 18
4.3 Kennojen elinikä avaruusmissioilla . . . 21
4.4 Suojalasin lisääminen . . . 22
5. Yhteenveto . . . 23
Lähteet . . . 25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	massaluku
FF	täytekerroin, engl. fill factor
I_{MPP}	virta maksimitehopisteessä
I_{SC}	oikosulkuvirta
J_{SC}	oikosulkuvirrantiheys
$L(T)$	Lindhardin partitiofunktio
MPP	maksimitehopiste
N	Avogadron vakio
P_{in}	saapuvan valon säteilytehokkuus
T	kiteessä generoituva energia
T_0	tulevan hiukkasen energia
$T_{d,eff}$	sähköisesti aktiivisten vaurioiden tuottamiseen vaadittu efektiivinen kynnysenergia
V_{MPP}	jännite maksimitehopisteessä
V_{OC}	avoimen piirin jännite
η	hyötysuhde
$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}T}$	differentiaalinen sironnan poikkipinta-ala atomien siirtymisten osalta
ϕ	säteilyannos
τ	vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä lopussa
τ_0	vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä ennen säteilylle altistumista
τ_e	vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä elektronisäteilyn vaikutuksesta
τ_p	vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä protonisäteilyn vaikutuksesta
AE-8	malli elektronisäteily-ympäristölle
AP-8	malli protonisäteily-ympäristölle

DDD	vaurioannos kidevirheille (engl. displacement damage dose)
DDEF	menetelmä vauriodatan sovittamiseen (engl. displacement damage equivalent particle fluence)
DLTS	engl. deep level transient spectroscopy
EQE	engl. external quantum efficiency
ESA	European Space Agency
fcc	pintakeskinen kuutio (engl. face-centered cubic)
GaAs	galliumarsenidi
GCR	galaktinen kosminen säteily (engl. galactic cosmic ray)
GEO	geostationäärinen kiertorata (engl. geostationary orbit)
GPS	engl. global positioning system
GSO	geosynkroninen kiertorata (engl. geosynchronous orbit)
II–IV-puolijohde	2. ja 4. pääryhmän alkuaineista koostuva yhdistepuolijohde
III–V-puolijohde	3. ja 5. pääryhmän alkuaineista koostuva yhdistepuolijohde
J–V-käyrä	virrantiheys–jännite-käyrä
JPL	US Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology
JUICE	JUpiter ICy moons Explorer
LEO	matala Maan kiertorata (engl. low Earth orbit)
MEO	keskikorkea Maan kiertorata (engl. medium Earth orbit)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIEL	ei-ionisoiva energiajättö (engl. Non Ionizing Energy Loss)
NRL	(US Naval Research Laboratory
NSSDC	National Space Science Data Center
ORC	Tampereen yliopiston Optoelektroniikan tutkimuskeskus
RDC	suhteellinen vauriokerroin (engl. relative damage coefficient)
RF	jäännösarvo (engl. remaining factor)
SAA	Etelä-Atlantin anomalia (engl. South Atlantic Anomaly)
SEE	engl. single event effect
TNID	menetelmä vauriodatan sovittamiseen (engl. total non-ionizing dose)

1. JOHDANTO

Maata kiertävät satelliitit ovat jo arkipäivää, ja ne ovat merkittävä osa nykypäivän tietoliikennettä. Lisäksi on olemassa monenlaisia muita avaruushankkeita. Avaruudessakin tarvitaan kuitenkin teholähde, jotta laitteet toimisivat. Erityisesti avaruudessa on tärkeää, että teholähde on jatkuva, luotettava ja turvallinen. Maata kiertävistä satelliiteista kaikki käyttävätkin primäärisenä teholähteenään aurinkokennoja (2008) [1]. Lisäksi avaruudessa käytetään akkuja ja jotkin avaruusalukset hyödyntävät ydinvoimaa. Pelkät akut eivät kuitenkaan riitä yhtään pidemmillä missioilla, ja ydinvoimaan perustuvat teholähteet eivät ole yhtä turvallisia kuin aurinkokennot. [2] On siis selvää, että avaruusaurinkokennojen rooli avaruushankkeissa on suuri ja niiden kehittämiseen halutaan panostaa.

Avaruusaurinkokennojen tärkeimmät kriteerit ovat suuri ominaisteho, pieni tilavuus, matala hinta ja luotettavuus [3]. Suuri teho massaa ja tilavuutta kohden on tärkeä ominaisuus, sillä avaruusalusten laukaisuhinnat riippuvat aluksen massasta ja koosta. Lisävaatimuksen avaruusaurinkokennoille tuo niiden säteilynkestävyys. Aurinkokennojen teho avaruudessa heikkenee huomattavasti ajan myötä. Avaruudessa kennot altistuvat erilaisille säteilytyypeille, jotka aiheuttavat siinä vaurioita. Erityisesti auringosta peräisin olevat energiset hiukkaset ja Maata ympäröivien Van Allenin vyöhykkeiden hiukkaset aiheuttavat merkittävää vahinkoa aurinkokennoissa. [4]

Nykyään III–V-moniliitosaurinkokennot ovat suuressa suosiossa avaruussektorilla. Ne ovat hyviä avaruusaurinkokennoja niiden korkeiden hyötysuhteiden ja hyvän säteilynkestävyyden ansiosta. [5] Tässä työssä on tutkittu Tampereen yliopiston Optoelektroniikan laitoksen aurinkokennoprototyyppiä, jonka myöhemmille versioille on tehty 30,8 % hyötysuhdeennätys [6].

Tässä kandidaatintyössä perehdytäänkin tarkemmin juuri säteilyn aiheuttamaan tehon heikkenemiseen avaruusaurinkokennoissa. Säteilytyypeistä erityisesti protonien ja elektronien aiheuttamiin vaurioihin kiinnitetään huomiota. Aluksi työssä tutustutaan III–V-puolijohteiden fysikaalisiin ominaisuuksiin ja moniliitosaurinkokennojen toimintaperiaaatteisiin. Tämän jälkeen perehdytään yleisesti säteilyn vaikutuksiin elektroniikassa. Erityisesti syvennytään yhdistepuolijohdeaurinkokennoissa syntyneisiin vaurioihin. Lisäksi työn teoriaosassa esitellään avaruuden eri alueissa ilmeneviä säteilytyyppejä. Työn myöhemmissä osissa keskitytään avaruusaurinkokennojen rappeutumiseen liittyvään tutkimuspuo-

leen. Ensin käsitellään aiheeseen liittyviä standardeja ja analyysimenetelmiä, joiden avulla voidaan tehdä tutkimusta avaruusaurinkoennojen rappeutumisesta. Tämän jälkeen esitellään tätä työtä varten tehtyjä virta–jännite-mittauksia InGaP/GaAs/InGaNAs-moniliitosaurinkokennoille ja pohditaan kennojen soveltuvuutta eri avaruuslennoille ja muille missioille.

2. FYSIKAALINEN PERUSTA

Tässä luvussa perehdytään työssä käsiteltävien ilmiöiden taustaan ja teoriaan. Aluksi käydään läpi aurinkokennojen toimintaperiaatteet ja rakenne. Sen jälkeen tutustutaan säteilyn aiheuttamiin tuhoihin elektroniikassa tarkentaen aurinkokennoihin. Lopuksi hahmotellaan avaruuden säteilytyyppejä, jotka voivat aiheuttaa vaurioita aurinkokennoissa.

2.1 Aurinkokennojen fysiikka

Aurinkokennojen rappeutumista ymmärtääkseen on ensin tunnettava aurinkokennojen toimintaperiaate. Seuraavissa alaluvuissa perehdymme fysikaalisiin ilmiöihin, joihin sähköntuotto aurinkokennoilla perustuu.

2.1.1 Puolijohteiden kiderakenne

Tämän päivän (5/2021) kaupallisessa käytössä olevat aurinkokennot valmistetaan puolijohteista. Puolijohteet ovat hyvä materiaali niiden kiderakenteen ansiosta. Pitkään vallalla olleessa kiteisessä piissä (Si) puhtaat piiatomit järjestäytyvät jaksolliseen timanttirakenteeseen. Timanttirakenteessa atomit ovat järjestäytyneet tetraedrisesti siten, että jokaisesta atomista lähtee neljä sidosta lähimpiin atomeihin, ja jokaisen sidoksen välinen kulma on 109,5 $^{\circ}$. [4, s. 85]

Tässä työssä käsitellään tarkemmin yhdistepuolijohteita kuten galliumarsenidia (GaAs). Galliumarsenidi koostuu galliumista ja arseenista. Koska gallium kuuluu 3. pääryhmään ja arseeni 5. pääryhmään, galliumarsenidi kuuluu III–V-puolijohteiden joukkoon. Vastaavasti 2. ja 4. pääryhmän alkuaineista muodostuvaa puolijohdeyhdistettä kutsutaan II–IV-puolijohteeksi. Toisin kuin pii, GaAs pakkautuu samantyyppisesti sinkkivälkkeen hilarakenteen (engl. zincblende lattice) tavalla [4, s.85]. Sinkkivälkkeen rakenne eroaa timanttirakenteesta vuorottelevien sivujensa pituuksilla, mikä johtuu siitä, että eri alkuaineiden atomit ovat erikokoisia [7, s. 30]. Tällainen sinkkivälkerakenne on yleinen monille III–V- ja II–IV-puolijohdeyhdisteille [4, s. 85], ja lisäksi joskus puolijohteet järjestäytyvät hieman erilaiseen wurtsiittirakenteeseen [7, s.30].

Aurinkokennomateriaalien kiderakenteen tunteminen on tärkeää, sillä siten voidaan ymmärtää materiaalin sähköisiä ominaisuuksia. Timanttirakenteiset puolijohteet sitoutuvat

kovalenttisesin sidoksin, ja ne jakavat valenssikuoren elektroneitaan, jotta kunkin osallistuvan atomin valenssikuoret saadaan täytettyä. Tällöin elektronit ovat sitoutuneet tiettyihin atomeihin, eivätkä ole vapaita liikkumaan, kuten metalleissa. Ne eivät kuitenkaan ole eristeitä, sillä jo terminen tai optinen energia voi saada viritettyä elektroneita sidoksesta. [7, s. 86] Yhdistepuolijohteet taas sitoutuvat sidoksin, joissa on sekä kovalenttista, että ioniluonnetta. Tämä johtuu siitä, että galliumin ja arseenin välinen elektronegatiivisuusero on riittävän suuri. [7, s. 86]

Käytännössä täydellisen periodisen kiderakenteen omaavan kennon valmistaminen ei ole itsestäänselvyys. Kennot, jotka ovat yhtä säännöllistä kidettä, kutsutaan erilliskiteisiksi (engl. monocrystalline/single-crystal) kennoiksi. Monesta pienestä erilliskiderakeesta koostuvia kennoja taas kutsutaan monikiteisiksi (engl. multicrystalline/polycrystalline) kennoiksi. Nämä rakeet ovat orientoituneet sattumanvaraisesti, ja niiden koko vaihtelee mikrometreistä senttimetreihin. [8, s.3]

Rakenteellinen säännöllisyys ja materiaalin puhtaus ovat merkittäviä aurinkokennojen hyvän toiminnallisuuden kannalta. Kiderakenteen epätäydellisyydet ja epäpuhtaudet lisäävät varauksenkulkettajien rekombinaatiota, joka heikentää kennojen toimintaa. [4, s.28]

2.1.2 Pn-liitos

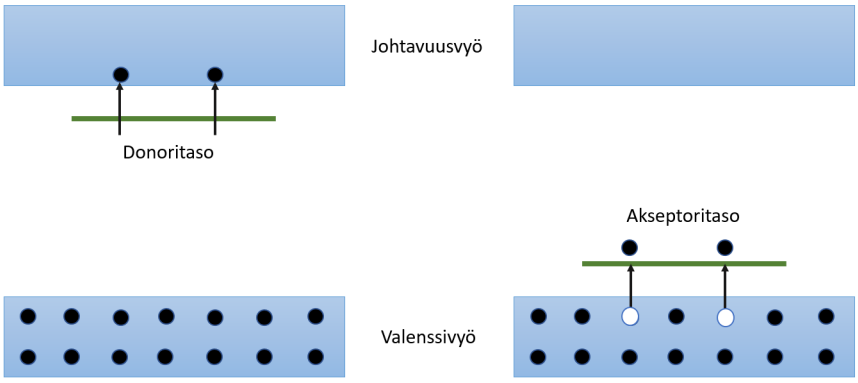
Sähkönjohtavuus edellyttää, että kiteestä löytyy vapaita varauksenkuljettajia, ja että niillä on nollasta poikkeava liikkuvuus hilassa. Vapaita varauksenkuljettajia voidaan synnyttää valolla tai lämmöllä, mutta tätä ei voi tapahtua, mikäli vyöt ovat elektroneista tyhjiä tai vastaavasti aivan täynnä. Elektroneille on siis oltava sallittuja tyhjiä energiatiloja. Puolijohteilla johtavuusvuo on 0 K lämpötilassa tyhjä ja valenssivyön energiatilat on täytetty. Vyöt ovat erillään toisistaan kuten eristeillä, mutta energiaero vöiden välillä on eristeisiin verrattuna pieni. [7, s. 90]

Itseispuolijohteeksi kutsutaan täydellistä puolijohdetta, jonka kiderakenteessa ei ole vikoja tai epäpuhtauksia. Tällöin varauksenkuljettajia ei ole 0 K lämpötilassa. Lämpötilan kasvaessa syntyy kuitenkin elektroni–aukko-pareja. Terminen energia virittää elektroneita valenssivyöltä johtavuusvyölle, ja valenssivyölle jää siis niin sanottu elektroniaukko, jota voidaan käsitellä positiivisena varauksenkuljettajana. Itseispuolijohteessa varausksenkuljettajia ovat vain näin muodostuneet elektronit ja aukot, joten niitä on myös sama määrä. [7, s. 103]

Puolijohteeseen voidaan lisätä epäpuhtausatomeja, jotta materiaaliin saataisiin lisää varauksenkuljettajia. Tällaista puolijohdetta kutsutaan seostetuksi puolijohteeksi. Merkittävä seuraus seostuksesta on, että energiavyörakenteeseen syntyy uusia energiatasoja sen yhteydessä. Nämä lisätyt tasot ovat useimmiten energialtaan valenssi- ja johtavuusvyön välissä. [7, s. 104] Esimerkiksi piihin voidaan seostaa liitoksen toiselle puolelle booria (B)

ja toiselle puolelle fosforia (P). Fosfori on V-ryhmän alkuaine, ja se luo energiatason hyvin lähelle piin johtavuusvyötä kuvassa. Elektronin virittämiseen tarvitaan nyt vain hieman energiaa, sillä 0 K lämpötilassa tämä taso on täynnä elektroneja. Uutta energiatasoa kutsutaan donoritasoksi, sillä epäpuhtausatomit luovuttavat tyypillisesti liki kaikki elektronit tältä energiatasolta jo matalissa lämpötiloissa (50-100 K). [7, s. 105] Tällä tavoin seostettua puolijohdetta kutsutaan nyt n-tyypin puolijohteeksi, sillä siinä on huoneenlämmössä enemmän negatiivisia varauksenkuljettajia [7, s. 104], kuten voidaan päätellä tilannetta hahmottavasta kuvasta 2.1.

Vastaavasti III-ryhmän seostetut puolijohteet, kuten boori, synnyttävät ylimääräisen energiatason lähelle piin valenssivyötä. Tätä edelleen 0 K lämpötilassa tyhjää energiatasoa kutsutaan nyt akseptoritasoksi, sillä se vastaanottaa elektroneja helposti. Materiaaliin saadaan siten suurempi määrä positiivisia varauksenkuljettajia, ja siksi tällaista materiaalia kutsutaan p-tyypin puolijohteeksi. [7, s. 106] Tätä on myöskin havainnollistettu kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. *Seostetut epäpuhtausatomit luovat energiatiloja energia-aukon sisälle ja lisäävät siten vapaita varauksenkuljettajia jo matalissa läpötiloissa. Tehty lähteen [7, s. 105] kuvan perusteella.*

Yhdistämällä p-tyypin puolijohde n-tyypin puolijohteeseen saadaan aikaan pn-liitos. Koska toisella puolella liitosta on nyt enemmän negatiivisia varauksenkuljettajia ja toisella puolella suurempi määrä positiivisia varauksenkuljettajia, ne alkavat kulkeutua liitoksen vastakkaisille puolille diffuusion johdosta. [7, s. 195]

Sekä p-tyypin, että n-tyypin puolijohteet ovat erikseen varausjakaumaltaan tasaisia, mutta varauksenkuljettajien diffundoituessa puolelta toiselle, liitoskohtaan alkaa muodostua varausjakaumaa. P-puoli alkaa varautua negatiivisesti ja n-puoli vastaavasti positiivisesti. [7, s. 196] Tällöin sähköinen vuorovaikutusvoima eli Coulombin voima alkaa vetää elektroneja takaisin n-puolelle ja aukkoja p-puolelle. Lopulta Coulombin voiman ja diffuusiovoiman välille löytyy tasapaino, jolloin varaustenkuljettajien kokonaisvirta on nolla. Siten liitoskohtaan muodostuu tyhjennysalue, jonka yli on jännite-ero. Tätä jännite-eroa V_0 kutsutaan kontaktipotentiaaliksi. [7, s. 197] Tyhjennysalueella ei ole juurikaan varauksenkuljettajia

syntyneen kentän vuoksi. Tyhjennysapproksimaation avulla voidaankin olettaa tyhjennysalueen olevan vapaa varauksenkuljettajista. Syntyneen sähkökentän voidaan ajatella aiheutuvan vain alueen donoreista ja akseptoreista, ja muita alueita voidaan pitää sähköisesti neutraaleina. [7, s. 200]

2.1.3 Aurinkokennojen sähköiset toimintaperiaatteet

Kun edellisessä alaluvussa kuvatun pn-liitoksen sisältävää aurinkokennoa nyt valaistaan, saadaan se tuottamaan virtaa. Sähkömagneettinen säteily saa puolijohteessa aikaan valosähköisen ilmiön, jolloin muodostuu uusia elektroni–aukko-pareja. Pn-liitoksen aiheuttaman kontaktipotentiaalin ansiosta nämä tyhjennysalueella generoituneet varauksenkuljettajat ajautuvat liitoksen eri puolille. Kun p- ja n-puolet kytketään virtapiiriin, varauksenkuljettajat saavat virran kulkemaan. [9]

Elektroni–aukko-parien generoitumiselle vastakkainen ilmiö on niiden rekombinaatio. Rekombinaatiossa elektroni–aukko-pari menetetään. Elektroni palaa johtavuusvyölle hävittäen sekä positiivisen, että negatiivisen varauksekuljettajan. [4, s. 94] Rekombinaatio voi tapahtua useammalla eri prosessilla. Energiatasojen erotusta vastaava energia voi muuntua sähkömagneettiseksi säteilyksi tai se voi siirtyä toiselle varauksenkuljettajalle. Rekombinaatio voi myös tapahtua sallittujen energiavöiden väliin syntyneiden tilojen kautta, mikäli kiderakenteessa on virheitä. Lisäksi varauskenkuljettaja voi rekombinoitua hilavärähtelykvantin kautta tuottaen lämpöä. [4, s. 95-96] Vähemmistövarauksenkuljettajien (aukot n-puolella ja toisin päin) elinikä kuvaa keskimääräistä aikaa, jonka varauksenkuljettaja ehtii olla johtavuusvyöllä ennen rekombinoitumistaan [9].

Ideaaliselle aurinkokennolle voidaan johtaa virta–jännite-yhteys

$$I = I_{SC} - I_{o1}(\mathrm{e}^{qV/kT} - 1) - I_{o2}(\mathrm{e}^{qV/2kT} - 1), \tag{2.1}$$

missä I_{SC} on oikosulkuvirta, I_{o1} on kvasineutraaleilla alueilla tapahtuvasta rekombinaatiosta johtuva pimeä saturaatiovirta (engl. dark saturation current), I_{o2} on tyhjennysalueella tapahtuvasta rekombinaatiosta johtuva pimeä saturaatiovirta, T on lämpötila, k on Boltzmannin vakio ja q on alkeisvaraus. I_{SC}, I_{o1} ja I_{o2} riippuvat aurinkokennomateriaaleista, kennojen rakenteesta ja olosuhteista. Vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä vaikuttaa näistä useampaan. [4, s. 111]

Aurinkokennojen hyvyyttä voidaan mitata esimerkiksi täytekertoimella (FF, engl. fill factor) ja hyötysuhteella. FF lasketaan seuraavanlaisesti, kun I_{MPP} ja V_{MPP} ovat virta ja jännite maksimitehopisteessä, I_{SC} on edelleen oikosulkuvirta ja V_{OC} on avoimen piirin jännite:

$$FF = \frac{I_{MPP}V_{MPP}}{I_{SC}V_{OC}}. \tag{2.2}$$

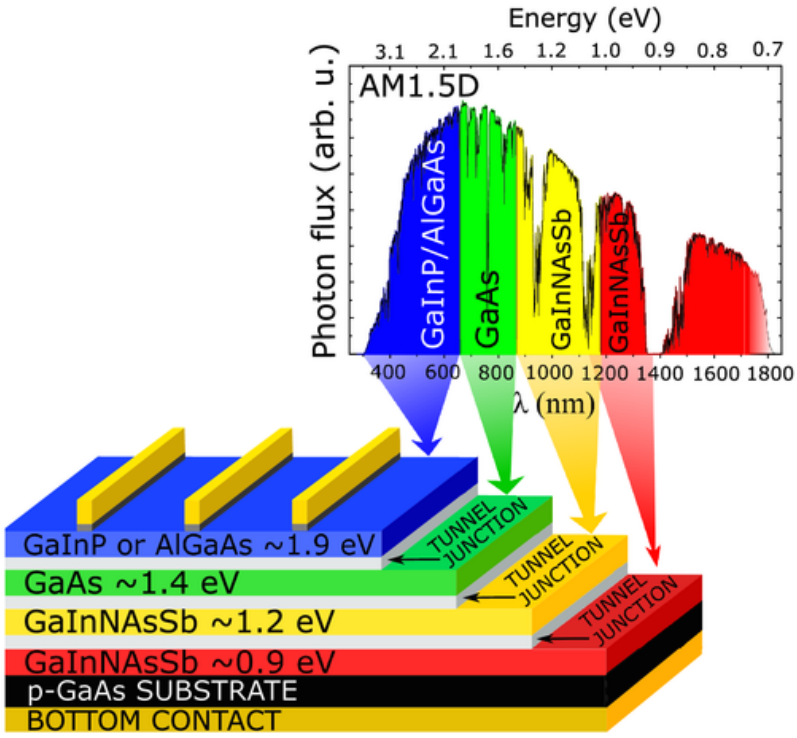
Hyötysuhde η taas lasketaan suhteena

$$\eta = \frac{I_{MPP}V_{MPP}}{P_{in}}, \tag{2.3}$$

jossa P_{in} on kennolle saapuvan valon säteilytehokkuus. [4, s. 113]

2.1.4 III–V-moniliitosaurinkokennojen rakenne

Eri materiaaleista tehdyt aurinkokennot absorboivat säteilyä eri aallonpituuksilla. Tämä spektrikaista määräytyy energiavöiden välisen energia-aukon perusteella, sillä valo voi absorboitua ja tuottaa vapaita varauksenkuljettajia vain, mikäli energia-aukko on pienempi kuin saapuvien fotonien energia. Yksiliitosaurinkokennojen tapauksessa suuri osa spektristä menee tällöin hukkaan. Energia-aukkoa pienempienergiset fotonit menevät materiaalin läpi muuttumatta sähköenergiaksi. Lisäksi energia-aukkoa suuremmilla fotonin energioilla ylimääräinen energia muuntuu lämmöksi. [4, s. 319] Moniliitosarinkokennoissa hyödynnetään useammasta eri materiaalista tehtyjä kennoja, jotka yhdistetään toisiinsa. Moniliitosaurinkokennot suunnitellaan siten, että kunkin kennon energia-aukko on eri suuruinen ja kerää siten eri spektrialueen kuvan 2.2 kaltaisesti. III–V-puolijohteille ja muille kiteisille puolijohteille kannattavinta on asettaa aina suuremman energia-aukon omaava kenno pienempiaukkoisen päälle [10]. Tässä työssä käsitellyt moniliitoskennot on toteutettu tunneliliitosten avulla.



Kuva 2.2. *Esimerkkikuva moniliitosaurinkokennon toimintaperiaatteesta [11]*

Moniliitosaurinkokennojen sähköistä luonnetta voidaan mallintaa sarjaan kytkettyinä diodeina, joilla on kaksi kontaktia. Moniliitosaurinkokennoista aiheutuu häviöitä muun muassa tunneliliitosten ja metallikontaktien takia. Näitä voidaan käsitellä vastaavasti sarjaan kytkettyinä alikennojen resistansseina. [12]

2.2 Säteilyn vaikutukset elektroniikkaan avaruudessa

Avaruudessa on paljon hiukkasia, joiden kineettinen energia on suuri. Mikäli hiukkasten energia on riittävän suurta, ne voivat aiheuttaa vahinkoa kappaleille, joihin ne osuvat. Vuorovaikutustapoja on useita, sillä hiukkasilla on usein liike-energian lisäksi massa ja varaus. Olennaista vaurioiden tutkimisen kannalta on hiukkastyypin lisäksi hiukkasten energiajakauma, sillä hiukkasten tehokkuus aiheuttaa vahinkoa riippuu tästä. Hiukkasen energia vaikuttaa sen tunkeutumissyvyyteen materiaalissa sekä energiaan, jonka hiukkanen voi luovuttaa. [13]

2.2.1 Tyypilliset vauriomekanismit

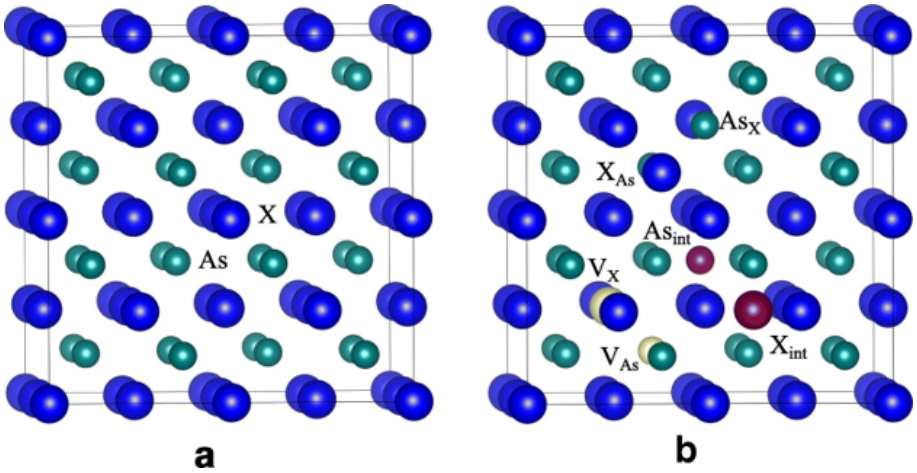
Säteilyn aiheuttamat vaikutukset elektroniikassa voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: useiden hiukkastörmäysten yhteisvaikutukseen tai yksittäisten hiukkasten aiheuttamiin vahinkoihin (SEEs, engl. single event effects) [14, s. 206]. Jälkimmäisellä tarkoitetaan tapausta, jossa yksittäinen vahvasti ionisoiva hiukkanen osuu herkkään paikkaan aiheuttaen muutoksia. Erilaisia SEE-vauriomekanismityyppejä on monia, ja niistä osa on tuhoisempia kuin toiset. [15, s. 16]

Tässä työssä keskitytään tarkemmin monen hiukkasen aiheuttamaan kokonaisvahinkoon. Ionisaatiovaurioiden (engl. ionization damage) vaikutuksesta puolijohteen ja eristeen rajapinnalle voi muodostua loukkoja ja pintatiloja [14, s. 206]. Niiden seurauksena jotkin materiaalit voivat tummua tai niiden fysikaaliset ominaisuudet voivat muuten muuttua [13]. Kiderakenteen vaurioissa (engl. displacement damage) taas atomien periodiseen kiderakenteeseen tulee häiriöitä. Tämä ilmiö on monille yhdistepuolijohteille merkittävämpi kuin ionisaatiosta johtuvat pintavauriot, joiden tarkastelu jätetäänkin tässä työssä vähäiseksi. [14, s. 207]

2.2.2 Kiderakenteen muutokset

Kiderakenteen muutokset syntyvät, kun riittävän energinen hiukkanen törmää niihin elastisesti ja saa atomin siirtymään pois alkuperäiseltä paikaltaan kiteessä. Kiderakenteen virheistä primäärisiä ovat muodostuvat vakanssit (engl. vacancy) ja välisija-atomit (engl. interstitials). Vakansseilla tarkoitetaan kidehilan paikkaa, joka on jäänyt tyhjäksi, kun atomi on siirtynyt paikaltaan. Välisija-atomiksi taas kutsutaan atomia, joka on siirtynyt paikkaan, joka ei ole kidehilan mukainen. [16] Kuvassa 2.3 on esitetty kidevirheitä galliumarsenidille

(GaAs). Kuvassa X-merkintä tarkoittaa tässä tilanteessa Ga-atomia. Kuvan **b** valkoiset pallot kuvaavat vakansseja (V) ja punaiset välisija-atomeja (alaindeksi int). Merkinnöissä alaindeksit X (Ga) ja As tarkoittavat atomeja, jotka alunperin olivat kyseisillä kidehilan paikoilla. Edelleen X_{As}-tilanteessa X-atomi (Ga) on siirtynyt As-atomin paikalle ja vastaavasti toisinpäin tilanteessa As_X. Tälläistä syntynyttä kidevirhettä kutsutaan vastapaikkakidevirheeksi (engl. antisite defect) [13].



Kuva 2.3. *Esimerkkikuva GaAs hilasta [17]*

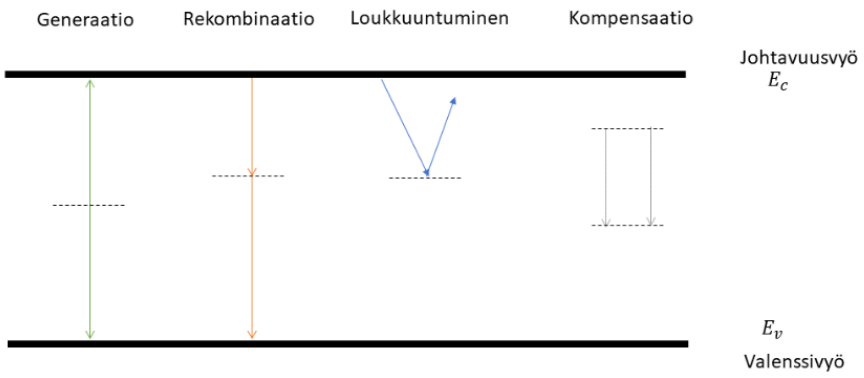
Kahdesta tai useammasta kidevirheestä muodostunutta kokonaisuutta voidaan käsitellä omantyyppisenä vaurionaan. Esimerkiksi Frenkelin pari koostuu yhdestä vakanssista ja välisija-atomista, kun taas divakanssi on kahden vakanssin summa. Tällaisia yhteisvauriotyyppejä on useita, sillä epäpuhtausatomien lisäämisen myötä syntyy myös virhe–epäpuhtaus-komplekseja (engl. defect-impurity complexes). [16]

Joskus kiderakenteesta irronnut atomi saa niin paljon kineettistä energiaa, että se voi aiheuttaa sekundäärisiä vaurioita kiderakenteessa [13]. Riittävän energeettiset hiukkaset voivat aiheuttaa suuriakin vaurioalueita. Tällaisissa klustereissa monta lähekkäistä kidevirhettä aiheuttaa suuremman kokonaisvahingon kuin yksittäiset kidevirheet. [15, s.14]

2.2.3 Kidevirheiden vaikutukset III–V-aurinkokennoihin

Periodisen kiderakenteen häiriöt synnyttävät uusia energiatiloja puolijohteessa. Tämä vaikuttaa materiaalin sähköisiin ja optisiin ominaisuuksiin monella tapaa. [16] Kuvassa 2.4 on hahmoitettu ylimääräisistä energiatiloista aiheutuvia merkittäviä prosesseja.

Kuvaan 2.4 merkityllä generaatiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa ilmiötä, jossa kidevirhe aiheuttaa energiatason, joka edistää varauksenkuljettajan siirtymistä valenssivyöltä johtavuusvyölle. Vastaavasti rekombinaatiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa ylimääräinen energiataso edesauttaa elektroni–aukko-parin rekombinoitumista. Lisäksi kuvassa on havainnollistettu loukkuuntumista (engl. trapping) ja kompensaatiota (engl. compensation).



Kuva 2.4. *Kidevirheiden aiheuttamien energiatasojen pääseuraukset aurinkokennoissa, tehty lähteen [18, s.604] kuvan perusteella*

Loukkuuntumisessa varauksenkuljettaja jää hetkellisesti jumiin energiatasoon, ja kompensaatiossa varauksenkuljettaja jää pysyvästi jumiin vauriotasojen vaikutuksesta. Kidevirheet voivat myös aiheuttaa lisäenergiatasoja, joiden vaikutuksesta tunneloitipotentiaali alenee ja tunnelointi lisääntyy. [18, s.604]

Edelleen näiden ilmiöiden merkittävin seuraus on vähemmistövarauksenkuljettajien liikkuvuuden väheneminen. Periodisen kristallirakenteen häiriöistä johtuen siis vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä τ pienenee seuraanvanlaisesti:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_p} + ..., \tag{2.4}$$

missä τ on vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä lopussa, τ_0 on vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä ennen säteilylle altistumista, τ_e on vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä elektronisäteilyn vaikutuksesta ja τ_p on vähemmistövarauksenkuljettajien elinikä protonisäteilyn vaikutuksesta. Vähemmistövarauksenkuljettajien eliniän pienentyminen pienentää kerättävää virtaa. Rekombinaatiokeskusten luonti nostaa rekombinaatio–generaatio-virtaa, joka muun muassa pienentää avoimen piirin jännitettä. [13]

2.2.4 Kiderakenteen vaurioiden pysyvyys

Kiteeseen välittömästi syntyvät hilavirheet eivät ole stabiileja, ja siksi epästabiilit vauriot alkavat järjestäytyä uudelleen stabiilimpiin muotoihin. Yleensä kidevirheiden uudelleenjärjestäytyminen pienentää pysyvien vahinkojen määrää ja niiden tehokkuutta (engl. annealing), mutta jotkin järjestäytymisprosessit johtavat pahempiin vahinkoihin (engl. reverse annealing). [16]

Heti vahinkojen syntymisen jälkeen kidevirheiden uudelleenjärjestäytyminen on nopeinta. Tämä uudelleenjärjestäytymisprosessin lyhytaikainen vaihe (engl. short-term annealing)

kestää sekunteista minuutteihin. Ajanjakso riippuu vaurion aiheuttaneen hiukkasen energiasta ja tyypistä. Lyhytaikaisen uudelleenjärjestäytymisprosessin jälkeen alkaa pitkäaikanen vaihe (engl. long-term annealing), joka voi kestää jopa vuosia. Mikäli materiaalin säteilytys on jatkuvaa ja tasaista, saavutetaan pysyvä tila (engl. steady-state), jossa uusia kidevirheitä ja uudelleenjärjestäytymistä tapahtuu samanaikaisesti. Tilanne on tämänkaltainen avaruudessa. [16]

Lämpötilalla (engl. thermal annealing) ja ylimääräisvarauksenkuljettajien konsentraatiolla (engl. injection annealing) on suuri vaikutus uudelleenjärjestäytymiseen. Varauksenkuljettajien lisäämiseksi materiaaliin onkin monia tapoja ja myös säteily, joka aiheuttaa kidevirheitä, nopeuttaa uudelleenjärjestäytymistä luomalla elektroni–aukko-pareja. [16]

2.3 Säteilytyypit avaruudessa

Eri avaruuden osissa on havaittu huomattavia määriä säteilyä, jota Maan päälle ei juurikaan pääse. Avaruuden säteilyllä tarkoitetaan enimmäkseen erilaisia varattuja hiukkasia. Hiukkaset eroavat toisistaan sekä hiukkastyypiltään, että energialtaan. Alaluvussa 2.2.2 käsiteltyjä kiderakenteen virheitä aurinkokennoissa aiheuttavat ennen kaikkea suurienergiset elektronit ja protonit. [18] Tässä kappaleessa käsitellään avaruuden säteilytyyppejä pääpiirteittäin ja hahmotellaan niiden alueellista jakaumaa suhteessa satelliittien kiertoratoihin.

Avaruussäteily koostuu pääasiassa galaktisesta kosmisesta säteilystä (GCR, engl. galactic cosmic ray), Auringosta peräisin olevista hiukkasista ja Maan loukkuuntuneilla vyöhykkeillä (engl. Earth's trapped radiation belts) olevista protoneista ja elektroneista. [15, s. 2] Galaktisella kosmisella säteilyllä tarkoitetaan korkeaenergisiä protoneja, alfahiukkasia ja raskaampia ioneja, jotka ovat peräisin meidän aurinkokuntamme ulkopuolelta. GCR sisältää kaikkia luonnollisesti esiintyviä alkuaineita ja ne voivat olla jopa 10^{11} GeV:iä energialtaan. Näin energiset hiukkaset pääsevät tunkeutumaan syvälle materiaaliin ja niiltä suojautuminen on hankalaa. [15] GCR:ää ei kuitenkaan esiinny riittävästi, jotta sen aiheuttamia vahinkoja voisi käsitellä monen hiukkasen yhteisvaikutuksena syntyneenä vauriotyyppinä [14]. Auringon magneettikentän ja aurinkotuulen ansiosta GCR:n hiukkasvuo vaihtelee Auringon aktiivisuusjakson myötä. Myös Maan magneettikenttä vaikuttaa GCR:ään saaden varaukselliset hiukkaset kulkemaan geomagneettisten kenttäviivojen suuntaisesti. [19] Täten magneettikenttä suojaa Maata GCR:ltä.

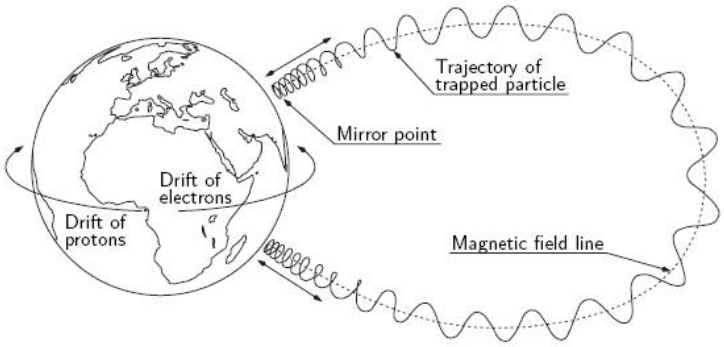
Auringolla on avaruussäteilyn kannalta olennainen rooli, sillä muiden säteilytyyppien hiukkasvuon moduloinnin lisäksi se on myös itse säteilyn lähde. Auringosta peräisin olevien hiukkasten joukossa on kaikkia luonnossa ilmeneviä alkuaineita [15]. Auringon aktiivisuusjaksot kestävät noin 22 vuotta. Ne koostuvat kahdesta syklistä, joissa on aina vuorottelevasti 7 korkean aktiivisuuden vuotta ja 4 matalan aktiivisuuden vuotta. Ensimmäisen 11 vuoden jälkeen Auringon magneettinen polaarisuus kääntyy vastakkaiseksi ja saman-

kaltaiset aktiivisuusmaksimit ja -minimit toistuvat. [19]

Auringon aktiivisuusmaksimin pienentyessä tapahtuu enemmän koronan massapurkauksia ja auringonpurkauksia. [15] Auringonpurkauksien jakauma samankaltainen kuin GCR:n, mutta hiukkasten energiat ovat pienempiä [14, s.212]. Ulkoavaruudessa ei ole keskimäärin kovinkaan paljon suurienergisiä protoneita, joten auringonpurkauksista peräisin olevat protonit ovat merkittävä tekijä aurinkokennojen vaurioitumisessa kauempana Maasta. Vaikka purkauksien määrä korreloi auringon aktiivisuusjaksojen kanssa, ne ovat kuitenkin hyvin satunnaisia. [14, s.218]

2.3.1 Maan säteilyvyöhykkeet

Avaruuden säteily ei ole jakautunut homogeenisesti Maan magnetosfäärissä ja heliosfäärissä, vaan eri säteilytyyppejä havaitaan eri määriä eri paikoissa. Säteilyn määrä ei ole myöskäään vakio ajan suhteen. [20, s. 336] Maan ympärillä on loukkuuntuneita säteilyvyöhykkeitä (engl. trapped radiation belts), joille Maan magneettigenttä on vanginnut varauksellisia hiukkasia (engl. trapped particles, trapped radiation belts) [14, s. 205]. Näitä vyöhykkeitä kutsutaan myös Van Allenin vyöhykkeiksi [18]. Vyöhykkeillä olevat varauksellisset hiukkaset kiertelevät pitkin kenttäviivoja kuvassa 2.5 hahmotetulla tavalla palaten takaisinpäin napojen kohdalla [20, s.386].



Kuva 2.5. *Varattujen hiukkasten liikeratojen hahmotelma Van Allenin vyöhykkeillä, ESA*

Van Allenin vyöhykkeet koostuvat pääasiassa elektroneista ja protoneista. Usein on järkevää puhua protoni- ja elektronivyöhykkeistä erikseen, sillä niiden hiukkasvuot ja energiaspektrit käyttäytyvät eri tavoin. Protonivyöhyke antaa yhden huippukohdan hiukkasvuon jakaumassa, kun taas elektroneille pysyviä huippuja on löydetty kaksi. [19] Lisäksi on havaintoja kolmannesta elektronivyöstä, joka ei ole samalla tavoin pysyvä [21].

Vyöhykkeet kaartuvat suuremmilla leveysasteilla, ja ne ovat myös eripaksuisia Maan ja Auringon asennon suhteen. Alueiden välinen matka on reilusti suurempi Maan sillä puolella, joka on kauempana Auringosta. [14, s. 213] Koska vyöhykkeiden korkeuskäyrät vaihtelevat, tietyllä vakiokorkeuksisella radalla olevat satelliitit kulkevat sekä elektoni-, että pro-

tonivyöhykkeiden läpi, elleivät ne sijaitse matalilla kiertoradoilla. Lisäksi alueella nimeltä Etelä-Atlantin anomalia (SAA, engl. south atlantic anomaly) protonivyöhyke tulee olennaisesti alemmas. [14, s. 214]

2.3.2 Maan kiertoradat

Satelliitit kiertävät Maata eri kiertoradoilla, joiden valintaan vaikuttaa muun muassa satelliitin tehtävät, sillä eri tyyppisillä kiertoradoilla on erilaisia ominaisuuksia. Kiertoratoja voidaankin luokitella useampien parametrien avulla. Yksi merkittävä tekijä on kiertoradan etäisyys Maasta. Kiertoradan korkeus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti satelliitin on kuljettava pysyäkseen radalla. Korkeus vaikuttaa olennaisesti myös siihen, miten kiertoradalta nähdään eri paikkoja, ja minne pystyy lähettämään dataa. Lisäksi radat eroavat toisistaan niiden eksintrisyyden ja inklinaation osalta. Eksentrisyys kuvaa radan muotoa, joka on vahvasti elliptinen eksentrisillä radoilla ja vastaavasti lähes pyöreä matalan eksentrisyyden radoilla. Inklinaatiolla taas tarkoitetaan kiertoradan kallistuskulmaa suhteessa päiväntasaajaan. Matalan inklinaation kiertoradat ovat siis suunnilleen päiväntasaajan yläpuolella, kun taas suuren inklinaation kiertoradat kulkevat napa-alueiden yli tai niiden läheltä. [18]

Matala Maan kiertorata (LEO, engl. low Earth orbit) käsittää radat, joiden korkeus on 500-2000 km [18]. Pienen inklinaation kiertoradoilla LEO-satelliitit altistuvat vain pienille määrille Maan säteilyvyöhykkeiden elektroneja ja protoneja, mutta suurempien inklinaatioiden radoilla annostukset ovat mittavampia magneettikentän muodon vuoksi. Lisäksi on huomioitava edellisessä alaluvussa 2.3.1 mainitun Etelä-Atlantin anomalian vaikutukset, mikäli kiertorata kulkee sen lävitse. [18]

Keskikorkea Maan kiertorata (MEO, engl. medium Earth orbit) taas ylettyy 2000 km korkeudesta 35780 km korkeuteen. Keskikorkeaa kiertorataa käytetään etenkin GPS-satelliittien (engl. Global Positioning System) yhteydessä. MEO-tasolla Maan säteilyvyöhykkeiden hiukkasvuot ja hiukkasten energiat ovat kuitenkin suuria. [18]

MEO-tasoakin korkeammalla on kiertorata, jota pitkin kulkevat satelliitit voivat liikkua Maan pyörimisnopeutta vastaavilla nopeuksilla. Tätä kutsutaan nimellä geosynkroninen kiertorata (GSO, engl. geosynchronous orbit), ja se kiertää Maata 35786 km korkeudessa. [22, s.87] Geostationäärinen kiertorata (GEO) on GSO-tyyppinen kiertorata, joka kiertää Maata päiväntasaajan kohdalla. Siellä satelliitit saadaan pysymään saman maantieteellisen paikan kohdalla, mitä hyödynnetään esimerkiksi tietoliikennnesatelliittien yhteydessä. [14] GEO-satelliittien säteily-ympäristö koostuu pääasiassa uloimman Van Allenin vyöhykkeen elektroneista, sekä auringonpurkauksien suurienergisistä protoneista, joilta magneettikenttä ei pysty näissä korkeuksissa enää suojaamaan yhtä hyvin. Protonivyöhyke on harvempi GEO-tasolla, mutta sitäkään ei voida jättää huomiotta. [18]

3. ILMIÖÖN LIITTYVÄ TUTKIMUS

Aurinkokennojen rappeutumista voidaan tutkia monella eri tavalla. Tässä luvussa avataan hieman yleisiä työkaluja kennojen rappeutumisen tutkimiseksi.

3.1 Standardeja

Avaruussäteilyyn liittyen on joitakin yleisesti käytössä olevia standardeja. Nämä liittyvät pääasiassa aurinkokennojen testaamiseen. Tällä hetkellä (5/2021) käytössä oleva avaruusaurinkokennojen testausstandardi (ISO 23038:2018) kertoo vaatimukset elektroni- ja protonisäteilytysmetodeille [23].

Lisäksi on olemassa yleisessä käytössä olevia malleja erilaisille avaruussäteilytyypeille. Maan magneettikenttään loukkuuntuneita elektroneja ja protoneja kuvaamaan on kehitetty useita malleja. A. N. Nikicio et al. työssä [24] on käytetty NASAn NSSDC:ssa (National Space Science Data Center) kehitettyjä malleja AE-8 (elektronit) ja AP-8 (protonit) [25]. Näitä malleja käytetään paljon kirjallisuudessa, mutta niitä halutaan kehittää edelleen. Koska loukkuuntuneet radat ovat hyvin dynaamisia, yksinkertaista tapaa esittää näiden hiukkasten energiajakaumaa täsmällisesti ei ole. [26]

Vastaavasti malleja on myös muille säteilytyypeille. A. N. Nikicio et al. työssä [24] Auringosta peräisin oleville energeettisille hiukkasille on käytetty JPL:n (Jet Propulsion Laboratory) protonimallia [27, 28]. Samassa työssä GCR:än mallinnukseen on käytetty ISO-15390 -avaruusympäristömallia [29].

3.2 Laskennallisia työkaluja rappeutumisanalyysille

Tässä alaluvussa avataan muutamia laskennallisia työkaluja, joilla voidaan analysoida säteilyn aiheuttamia vahinkoja aurinkokennoissa. Yleisesti käytössä on kaksi metodia vauriodatan sovitukseen: JPL- ja NRL-metodit. [30]

Ensimmäisellä tarkoitetaan JPL:län (US Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology) kehittämää menetelmää, joka tunnetaan myös termillä DDEF (engl. displacement damage equivalent particle fluence) [30]. DDEF perustuu suhteellisten vauriokertoimien (RDC, engl. relative damage coefficient) laskentaan. Suhteelliset vauriokertoimet kuvaavat eri energisten hiukkasten aiheuttamaa vauriota suhteessa johonkin referens-

sihiukkaseen. Vauriokertoimet kertovat, kuinka suuri hiukkasvuo referenssihiukkasta on oltava suhteessa kyseisen hiukkasen vuohon, jotta se vastaa hiukkasen aiheuttamaa tuhoa. Tyypillisesti referenssihiukkasina käytetään 1 MeV elektroneita tai 10 MeV protoneita. [31]

DDEF-menetelmään tarvitaan paljon säteilydataa eri määrillä eri energisiltä protoneilta ja elektroneilta. Datasta määritetään suhteelliset vauriokertoimet monille eri elektroni ja protonienergioille, joiden avulla saadaan myös 10 MeV protonivaurion ja 1 MeV elektronivaurion empiirinen yhteys. Lopulta tunnettu hiukkasympäristö voidaan esittää 1 MeV elekroniannoksen ekvivalenttina, siten että se vastaa todellista vahinkoa. [30] Suhteelliset vauriokertoimet on kuitenkin on määritettävä uudelleen kullekin tietynlaiselle aurinkokennotyypille [31].

Toisen menetelmän vauriodatan sovitukseen on kehittänyt NRL (US Naval Research Laboratory). Tämä analyyttisempi lähestymistapa tunnetaan myös nimityksillä (T)NID-menetelmä (engl. total non-ionising dose) [30] ja DDD-menetelmä (engl. displacement damage dose) [31]. Olennaisia kertoimia tässä lähestymistavassa on NIEL (engl. non-ionizing energy loss) ja kiderakenteen vaurioiden määrää kuvaava DDD. NIEL esittää energiaa, jonka hiukkanen menettää aiheuttaessaan kiderakenteen muutoksia materian läpi kulkiessaan. Toisin sanoen NIEL on kuvaa kuinka paljon kiderakenteen vauriota energeettinen hiukkanen voi aiheuttaa. [15, s. 15]

NIELin laskenta voidaan tehdä sekä analyyttisesti, että Monte Carlo -simulointia hyödyntäen [31]. NIEL voidaan laskea kaavalla

$$NIEL(T_0, T_{d,eff}) = \frac{N}{A} \int_{T_{d,eff}}^{T_{max}(T_0)} L(T) T \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}T} \right)_{T_0} \mathrm{d}T, \tag{3.1}$$

missä T on kiteessä generoituva energia, T_0 on tulevan hiukkasen energia ja $T_{d,eff}$ on sähköisesti aktiivisten vaurioiden tuottamiseen vaadittu efektiivinen kynnysenergia. Kaavan muista parametreistä N on Avogadron vakio, A on massaluku, $L(T)$ on Lindhardin partitiofunktio ja $\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}T}$ on differentiaalinen sironnan poikkipinta-ala atomien siirtymisten osalta. [30]

NIELin avulla voidaan edelleen laskea DDD-arvo, jonka avulla virta–jännite-mittauksista saatuun dataan voidaan tehdä sovite, joka kuvaa sähköisten parametrien heikkenemistä varsin tarkasti. Lisäksi muutamien lisätietojen avulla voidaan tutkia suojalasin vaikutusta kennojen tehon heikkenemiseen. [18]

NRL-metodi vaatii mittauksia yhdellä protonienergialla ja kahdella eri elektronien energioilla. Tämä on kuitenkin paljon vähemmän, kuin mitä JPL-metodi vaatii. [18]

3.3 Analyysiohjelmistoja ja säteilyvaurioanalyysi

Koska useimmat kennojen rappeutumiseen liittyvät tarkemmat analyysit vaativat suurta määrää mittausdataa, laskentaan on olemassa monia eri ohjelmistoja. NIELin laskuun on olemassa työkaluja selaimessa esimerkiksi lähteessä [32]. TNID:in laskemiseen on useampi keino, esimerkkinä tästä on Monte Carlo -laskentaa hyödyntävä GEANT4-ohjelma [33].

Kennojen rappeutumista voidaan lisäksi tutkia säteilyn aiheuttaman tuhoalueen avulla. Vaurioiden tuhoalue riippuu sen aiheuttaman hiukkasen tyypistä ja energiasta sekä kohdemateriaalista. Tätä aluetta voidaan tutkia saapuvan hiukkasen tunkeutumissyvyyden (engl. penetration depth) ja energiajätön (engl. energy loss / stopping power) avulla. Tutkintaan voidaan käyttää esimerkiksi NIST:in ESTAR- ja PSTAR-tietokantoja [34] tai SRIM-ohjelmistoa [35].

Aurinkokennojen vaurioitumista voidaan myös tutkia erilaisilla laitteistoilla. Kennoille voidaan tehdä virta–jännite-mittauksia aurinkosimulaattorin avulla, kuten tässä työssä ollaan tehty. Näistä saadaan selvitettyä paljonko esimerkiksi hyötysuhde on laskenut, mikäli kennot ovat saaneet jonkin säteilyannostuksen. EQE-mittauksilla (engl. external quantum efficiency) taas saadaan selvitettyä kuinka tehokkaasti fotoni saadaan muunnettua varauksenkuljettajaksi. Yhdessä virta–jännite-mittausten kanssa sen avulla voidaan lisäksi selvittää syntyneen vahingon määrä ja paikka [36]. Näiden lisäksi DLTS:ällä (engl. deep level transient spectroscopy) voidaan tutkia erilaisia vaurioita puolijohteissa [37]. Mittaamiseen ja analysointiin on muitakin keinoja, mutta tämän työn puitteissa ei näihin perehdytä tämän tarkemmin.

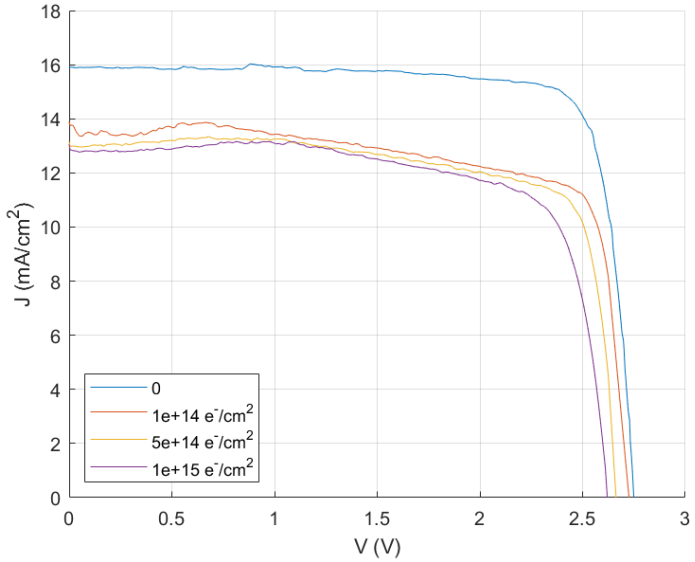
4. MITTAUKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa käydään läpi III–V-moniliitosaurinkokennoille tehtyjä mittauksia ja analysoidaan tuloksia. Kennojen säteilynkestävyyttä vertaillaan kaupallisiin avaruusaurinkokennoihin ja tuloksien merkitystä arvioidaan eri avaruusmatkoilla.

4.1 Säteilytetyjen aurinkokennojen mittaukset

Tämän kandidaatintyön kokeellisessa osassa mitattiin tiettyjen III–V-moniliitosaurinkokennojen tehon heikkenemistä. Neljästä samanlaisesta InGaP/GaAs/InGaNAs-kolmiliitoskennosta kolmea oli altistettu 1 MeV energisille elektroneille. Kukin näistä oli saanut eri suuruisen säteilyannoksen, joten kennojen heikkenemistä voitiin demonstroida säteilyympäristössä ikäänkuin ajan funktiona. Säteilyannokset kennoille olivat $1 \cdot 10^{14}$ e/cm^2, $5 \cdot 10^{14}$ e/cm^2 ja $1 \cdot 10^{15}$ e/cm^2. Kennojen säteilytys oli tehty noin viisi vuotta aiemmin TU Delftin yliopistossa Hollannissa. Tutkitut kennot olivat pinta-alaltaan 4 cm^2 (2 cm $\times$ 2 cm). Kyseessä olevat aurinkokennot ovat aikaisempia kehitysversioita aurinkokennoille, joille ORC on yhdessä CESI:n kanssa tehnyt 30,8 %:n hyötysuhde-ennätyksen [6]. Tämän takia näiden kennojen hyötysuhteet eivät ole aivan yhtä hyviä.

Kennoille tehtiin virta–jännite-mittaukset aurinkosimulaattorin (OAI 7 kW Trisol Solar Simulator) avulla Tampereen yliopiston Optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa. Aurinkosimulaattorin valaisun intensiteetti oli ASTM E490 standardin mukainen, kirkkaudella 1358 W/m^2, ja mittauslämpötila oli noin 25 °C. Mittausdatasta saadut J–V-käyrät (virrantiheys–jännite) kullekin kennolle on esitetty kuvassa 4.1. Kennoja vastaavat mittausdatat on eroteltu kennojen saamien säteilyannosten avulla.

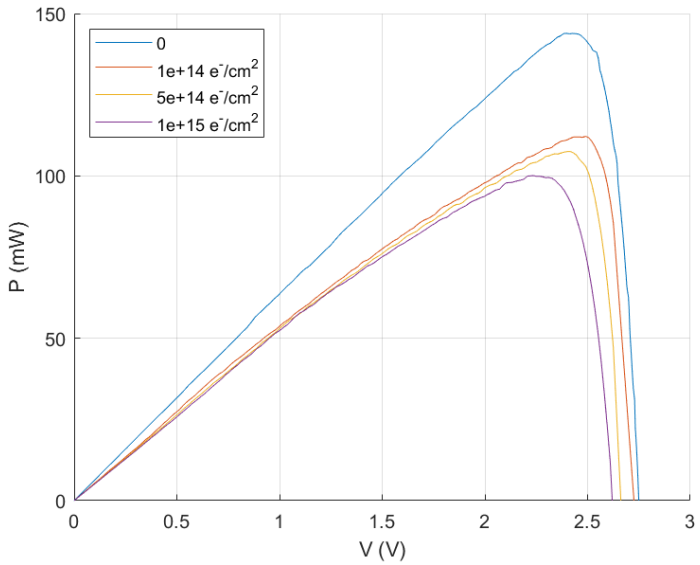


Kuva 4.1. *Virrantiheys–jännite-käyriä*

J–V-käyristä nähdään helposti avoimen piirin jännitteen ($J = 0$) vähentyminen säteilyannoksen lisääntyessä. Myöskin oikosulkuvirrantiheys ($V = 0$) pienenee huomattavasti.

4.2 Mittausdatan analysointi

Edellisessä alaluvussa esitetyt virrantiheys–jännite-käyrät voidaan esittää myös havainnollistavammin teho–jännite-käyrinä. Säteilytettyjen aurinkokennojen tehon heikkeneminen voidaankin nähdä selvästi tehokäyristä, jotka on esitetty kuvassa 4.2.



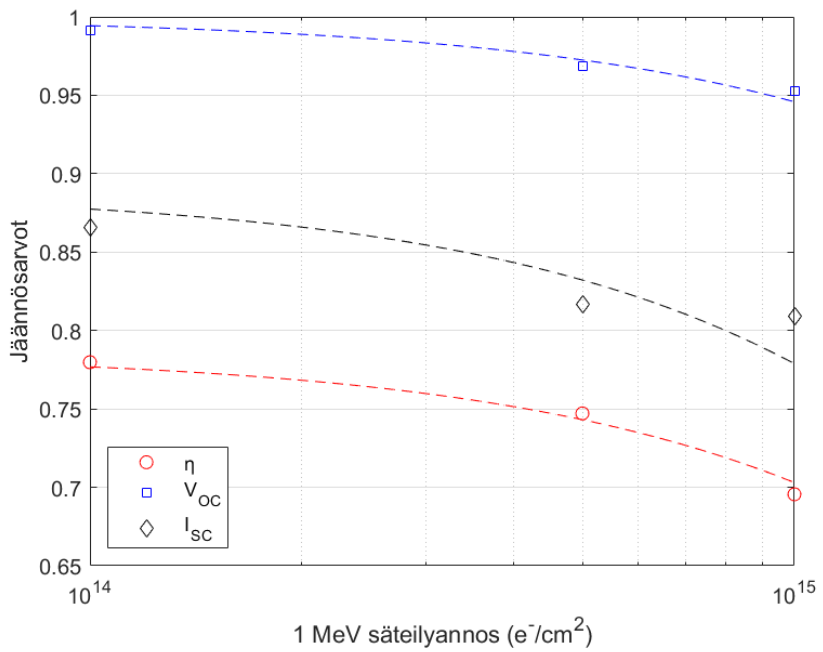
Kuva 4.2. *Tehokäyriä eri säteilymäärän saaneille kennoille*

Mittausdatoista saatiin myös laskettua taulukon 4.1 mukaisia tunnuslukuja eri säteilyannostuksen saaneille kennoille. Taulukossa FF on täytekerroin, J_{SC} on oikosulkuvirrantiheys, V_{OC} on avoimen piirin jännite ja I_{PPM} ja U_{PPM} ovat virta ja jännite maksimitehopisteessä PPM (engl. maximum power point).

Taulukko 4.1. *Kennojen sähköisiä parametreja*

Säteilyannos ϕ (1/cm^2)	0	1e14	5e14	1e15
Hyötysuhde η (%)	26,5	20,7	19,8	18,4
FF	0,823	0,748	0,778	0,743
J_{SC} (mA/cm^2)	15,9	13,8	13,0	12,9
V_{OC} (V)	2,75	2,73	2,66	2,62
I_{PPM} (A)	0,0600	0,0450	0,0445	0,0448
V_{PPM} (V)	2,40	2,49	2,42	2,24
PPM (W)	0,144	0,112	0,108	0,100

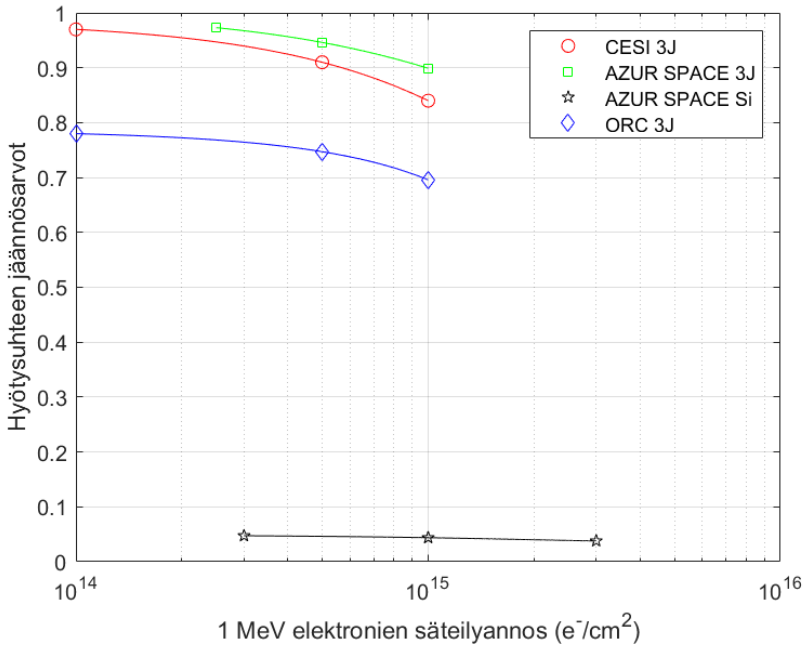
Oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen heikkenemistä säteilymäärän kasvaessa on kuvattu tarkemmin kuvassa 4.3. Kuvassa esitetyt mittapisteet ovat hyötysuhteen, avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran jäännösarvoja (RF, engl. remaining factor). Jäännösarvot lasketaan kullekin parametrille S suhteena $RF(S) = \frac{S(\phi)}{S_0}$, jossa $S(\phi)$ on parametrin S arvo säteilyannoksen ϕ jälkeen ja S_0 on parametrin arvo ennen säteilytystä.



Kuva 4.3. *Jäännösarvot hyötysuhteelle η, avoimen piirin jännitteelle V_0 ja oikosulkuvirralle I_0 eri säteilyannoksilla*

Kuvaan 4.3 on sovitettu eksponenttikäyrät, joita ei tosin kannata käyttää ekstrapolointiin, sillä niiden malli ei ole fysikaalinen. Kuvasta katsottuna on nyt kuitenkin selvää, että elektronisäteily heikentää kennojen toimintaa merkittävästi. Tämä on huomioitava avaruuden missioita suunnitellessa, jotta tehot riittävät laitteiden toimintaan koko suunnitellun eliniän ajan.

Kuvassa 4.4 on vertailtu tässä työssä tutkittuja aurinkokennoja (merkintä ORC) kaupallisiin avaruusaurinkokennoihin. Kuvaan on merkitty eri aurinkokennojen hyötysuhteiden jäännösarvoja. Yksi näistä kennoista on CESIn kolmiliitosaurinkokenno (CTJ30) [38]. AZUR SPACE -kennoista tähän vertailuun on valittu sekä piikenno (S 32) [39], että kolmiliitosaurinkokenno (3G30C) [40]. Kolmiliitoskennot on merkitty kuvaan lyhenteellä 3J (engl. triple junction). Kuvaan on sovitettu polynomikäyrät, joita voidaan käyttää interpolointiin. Ekstrapolointiin käyriä ei kannata kuitenkaan käyttää, sillä niiden malli ei ole fysikaalinen.



Kuva 4.4. *Eri avaruusaurinkokennojen hyötysuhteiden jäännösarvoja η 1 MeV elektronien säteilyannoksilla*

Kuten kuvasta 4.4 nähdään, tässä työssä käytetyt aurinkokennot jäävät säteilynkestävyydeltään vielä hieman kaupallisten moniliitosavaruusaurinkokennojen varjoon. Tämä oli odotettavissakin, sillä nämä olivat vielä kehitysvaiheen kennoja. Lisäksi kennoista puuttuu suojalasi. ORC:in prototyyppien hyötysuhteiden jäännösarvot ovat kuitenkin reilusti parempia kuin piikennojen, jotka on suunniteltu avaruuskäyttöön. Tämä vaikuttaa hyvin lupaavalta, vaikka toisilla moniliitoskennoilla onkin päästy parempiin lukemiin.

Toisaalta ORC:n kennojen säteilytyksen ja mittausten välillä on kulunut aikaa sen verran kauan, että osa syntyneistä kidevirheistä on ehtinyt palautua jonkin verran. Jäännösarvot ovat siis luultavasti olleet vielä hiukan huonompia heti säteilytyksen jälkeen.

4.3 Kennojen elinikä avaruusmissioilla

Tämän työn luvun 3 alaluvussa 3.2 kuvattiin, kuinka avaruuden säteily-ympäristö voidaan esittää 1 MeV elektronin vaurioekvivalenttina. Ekvivalenttiarvojen määritys riippuu olennaisesti kennomateriaaleista, ja erilaisille kennoille onkin saatu erisuuruisia elektronisäteilyannoksia samoille avaruuden missioille. Taulukossa 4.2 on esitetty vertailun vuoksi arvoja piikennoille eri avaruusmissioilla. Taulukossa kiertoradat on ilmoitettu niiden korkeuden ja inklinaation avulla. Jälkimmäinen termi kuvaa kiertoradan kallistuskulmaa suhteessa päiväntasaajaan.

Taulukko 4.2. *1 MeV elektronisäteilyannoksen ekvivalentteja piikennoille eri avaruusmatkoilla [4, s.373]*

Avaruusmissio	Säteilyannos ϕ (1/cm^2)
500 km, 28,5°	1e13
700 km, 100°	1,5e14
3241 km, 100 °	1e17
GEO, 0°	2,5e15
Kuu	2e15
Ulkoavaruus	3e15

GaAs-kennoille ja joillekin moniliitosaurinkokennoille on käytetty kirjallisuudessa hieman eri ekvivalenttiarvoja kuvaamaan säteilymäärää. Mikäli oletetaan tässä työssä tutkittujen kennojen käyttäytyvän jokseenkin samalla tavalla, voidaan tehdä joitakin karkeita arvioita kennojen tehokkuudelle mission lopulla.

Energialtaan 1 MeV elektroneiden $1 \cdot 10^{15}$ e/cm^2 säteilyannostusta on usein pidetty hyvänä arviona kuvaamaan GEO-missioilla 15 vuodessa syntyvien vaurioiden määrää tällaisille kennoille [41, 42]. Näille missiolle onkin siis jo määritetty EOL-ennuste. Kyseistä avaruusmissiota suunnitellessa voidaan varautua siihen, että kennojen hyötysuhde on pienentynyt 30,6 %:a. Kennon hyötysuhde olisi siis avaruusmission lopussa 18,4 %.

10 vuoden LEO-missioille taas vaurioita kuvaava 1 MeV:in elektronisäteilyannostuksen on esitetty olevan viidestä kymmeneen kertaan vähäisempiä [41, 42]. $5 \cdot 10^{14}$ e/cm^2 säteilyannostuksen saaneilla kennoilla voitaisiin siis vastaavasti kuvata LEO-mission aurinkokennojen EOL-arvoja. Hyötysuhteelle tämä tarkoittaisi tässä tapauksessa 25,3 %:in laskua eli loppuhyötysuhdetta 19,8 %.

M. Meusel et al. mukaan Van Allenin vyöhykkeiden läpi kulkevilla MEO-missioilla taas 1 MeV elekronisäteilyannosekvivalentti olisi moniliitoskennoille jopa yli $1 \cdot 10^{16}$ e/cm^2 [43]. Lisäksi JUICE-mission (JUpiter ICy moons Explorer) yhteydessä Jupiterin loukkuuntuneiden hiukkasten aiheuttamaksi vastaavanlaisen säteilyannoksen on odotettu olevan

$2,5 - 3 \cdot 10^{15}$ e/cm^2 moniliitosaurinkokennoille [44].

4.4 Suojalasin lisääminen

Aurinkokennojen säteilynkestävyyttä voidaan parantaa suojalasilla. Suojalasin hyödyt perustuvat hiukkasten hidastamiseen ja pysäyttämiseen ennen itse kennorakenteeseen pääsemistä. Erintyisen huomattavaa on, että suojalasi pysäyttää matalan energian protoneita. R. Hoheisel et al. ovat julkaisussaan tutkineet matalaenergisen (< 1 MeV) protonisäteilyn aiheuttamaa tuhoa GaInP/GaAs/Ge-moniliitosaurinkokennoissa [45]. Artikkelista käy ilmi, että matalaenergiset protonit pysähtyvät kennoon aiheuttaen suuren tuhoalueen matkansa loppupäähän. Siispä on erityisen edullista, mikäli tällaiset protonit saadaan pysähtymään jo ennen kennoon tunkeutumista.

Lisäksi suojalasi suojaa mikrometeoreilta ja sitä voidaan hyödyntää myös muihin kennon toimintaa tehostaviin toimiin. [4, s. 373] Tässäkin työssä käsitellyille aurinkokennoprototyypeille voitaisiin lisätä suojalasi parantamaan niiden säteilynkestävyyttä.

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin säteilyn vaikutusta aurinkokennojen tehon heikkenemiseen avaruudessa. Työssä pohdittiin eri säteilytyyppien aiheuttamia vaurioita ja vaurioiden laatua. Lisäksi huomioitiin, miten eri säteilytyypit ovat jakautuneet eri osissa avaruutta.

Aurinkokennojen rappeutumisen kannalta todettiin elektroni- ja protonisäteilyn olevan merkittävimpiä tekijöitä avaruuden säteily-ympäristössä. Elektronit ja protonit nimittäin aiheuttavat muutoksia aurinkokennomateriaaleissa. Näiden kidevirheiden vaikutusta kennojen sähköiseen toimintaan selitettiin energiavyörakenteen muutoksilla. Syntyneiden energiatasojen todettiin muun muassa vähentävän vähemmistövarauksenkuljettajien liikkuvuutta, jolla on yhteys useampiin aurinkokennojen sähköisiin ominaisuuksiin. Lisäksi työssä huomioitiin kidevirheiden uudelleenjärjestäytyvän ajan kuluessa siten, että kennot ikään kuin palautuvat hieman säteilytyksen jäljiltä. Tämän prosessin nopeuttamismenetelmiksi mainittiin injektointi ja lämmitys.

Työn jälkimmäisissä osissa keskityttiin aurinkokennojen rappeutumisen tutkimuspuoleen. Esitettiin hyödyllisiä malleja, joiden avulla voidaan esittää avaruuden säteilyjakaumia, sekä joitakin yleisiä mittaus- ja analysointimenetelmiä. Tätä työtä varten tehtiin myös virta–jännite-mittauksia Tampereen yliopiston optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa (ORC) eräille siellä tehdyille avaruusaurinkokennoprototyypeille. Työssä käytetyt kennot olivat InGaP/GaAs/InGaNAs-moniliitosaurinkokennoja, ja niitä oli altistettu eri suuruisille annoksille 1 MeV elektroneita. Mittauksista nähtiin selvästi sähköisten ominaisuuksien heikkeneminen säteilyannoksen kasvaessa. Mitatun oikosulkuvirran, avoimen piirin jännitteen ja maksimitehopisteen arvoista laskettiin jäännösarvot kennojen hyötysuhteelle ja verrattiin niitä tämän päivän (2021) kaupallisiin avaruusaurinkokennoihin. Todettiin tässä työssä tutkittujen kennojen säteilynkestävyydessä olevan vielä parantamisen varaa, mikä ei yllättänyt, sillä nämä olivat vielä tutkimusvaiheessa olevia kennoja. Huomattiin kuitenkin myös, että jo nämä prototyypit ovat paljon parempia kuin piistä tehdyt avaruusaurinkokennot.

Kennojen säteilynkestävyyden parantamiseksi esitettiin muun muassa suojalasia. Lisäksi voitaisiin tehdä jatkotutkimuksia vaurioiden syntymiseen juuri näissä kennoissa, sillä säteilyn vaikutukset riippuvat olennaisesti kennomateriaalista ja pienistäkin eroista rakenteessa. Mikäli vaurioiden huomattaisiin keskittyvän johonkin tiettyyn alueeseen kennois-

sa, voitaisiin panostaa sen kehittämiseen tai voitaisiin lisätä sinne kennon toimintaan osallistumaton kerros. Lisämittauksia voitaisiin tehdä myöskin säteilyttämällä kennoa eri energisillä protoneilla, jotta kennojen rappeutumista voitaisiin ennakoida paremmin eri avaruusympäristössä.

LÄHTEET

[1] Elbert, B. R. *Introduction to satellite communication*. 3rd ed. Includes bibliographical references and index. Boston: Artech House, 2008.

[2] Summerer, L., Gardini, B. and Gianfiglio, G. *ESA's Approach to Nuclear Power Sources for Space Applications*. May 2007.

[3] Partain, L. D. and Fraas, L. M. *Solar cells and their applications*. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2010.

[4] Luque, A. and Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.

[5] Sproewitz, T., Banik, U., Grundmann, J.-T., Haack, F., Hillebrandt, M., Martens, H., Meyer, S., Reershemius, S., Reininghaus, N., Sasaki, K., Seefeldt, P., Sergeev, O., Spietz, P., Sznajder, M., Toth, N., Vehse, M., Wippermann, T. and Zander, M. E. Concept for a Gossamer solar power array using thin-film photovoltaics. *CEAS space journal* 12.1 (2020), pp. 125–135. DOI: 10.1007/s12567-019-00276-6.

[6] Campesato, R., Tukiainen, A., Aho, A., Gori, G., Isoaho, R., Greco, E. and Guina, M. 31% European InGaP/GaAs/InGaAs Solar Cells for Space Application. *E3S Web of Conferences* 16 (2017), p. 3003. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603003.

[7] Streetman, B. and Banerjee, S. *Solid State Electronic Devices, Global Edition*. English. Harlow, United Kingdom: Pearson Education, Limited, 2015.

[8] Fahrner, W. R., Muehlbauer, M. and Neitzert, H. C. *Silicon Heterojunction Solar Cells*. English. Zurich: Trans Tech Publications, Limited, 2006.

[9] C.B.Honsberg ja S.G.Bowden. *Photovoltaics Education Website*. 2019. URL: www.pveducation.org (viitattu 16. 05. 2021).

[10] McEvoy, A., Markvart, T. and Castaner, L. *Practical Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications*. English. Vol. 2nd ed. Waltham, MA: Academic Press, 2012.

[11] Aho, A., Isoaho, R., Raappana, M., Aho, T., Anttola, E., Lyytikäinen, J., Hietalahti, A., Polojärvi, V., Tukiainen, A., Reuna, J., Peltomaa, L. and Guina, M. Wide spectral coverage (0.7–2.2 eV) lattice-matched multijunction solar cells based on AlGaInP, AlGaAs and GaInNAsSb materials. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* n/a (2021). DOI: https://doi.org/10.1002/pip.3412.

[12] Aho, A. *Dilute Nitride Multijunction Solar Cells Grown by Molecular Beam Epitaxy*. 2015.

[13] Anspaugh, B. E. *GaAs Solar Cell Radiation Handbook*. 1996.

[14] Allan, H. J. *Reliability And Radiation Effects In Compound Semiconductors*. English. Singapore: World Scientific, 2010.

[15] Bagatin, M. and Gerardin, S. *Ionizing Radiation Effects in Electronics*. 1st ed. CRC Press, 2018.

[16] Srour, J. R., Marshall, C. J. and Marshall, P. W. *Review of displacement damage effects in silicon devices*. 2003. DOI: 10.1109/TNS.2003.813197.

[17] Jiang, M., Xiao, H., Peng, S., Qiao, L., Yang, G., Liu, Z. and Zu, X. First-Principles Study of Point Defects in GaAs/AlAs Superlattice: the Phase Stability and the Effects on the Band Structure and Carrier Mobility. *Nanoscale research letters; Nanoscale Res Lett* 13.1 (2018), pp. 301–13. DOI: 10.1186/s11671-018-2719-7.

[18] Gao, X., Yang, S.-s. and Feng, Z.-z. *Radiation Effects of Space Solar Cells*. 2014.

[19] Bourdarie, S. and Xapsos, M. The Near-Earth Space Radiation Environment. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55.4 (2008), pp. 1810–1832. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001409.

[20] Leroy, C. and Rancoita, P. G. *Principles of radiation interaction in matter and detection*. 3rd ed. Singapore: World Scientific, 2012.

[21] Baker, D. N., Kanekal, S. G., Hoxie, V. C., Henderson, M. G., Li, X., Spence, H. E., Elkington, S. R., Friedel, R. H. W., Goldstein, J., Hudson, M. K., Reeves, G. D., Thorne, R. M., Kletzing, C. A. and Claudepierre, S. G. A Long-Lived Relativistic Electron Storage Ring Embedded in Earth's Outer Van Allen Belt. *Science* 340.6129 (2013), pp. 186–190. DOI: 10.1126/science.1233518.

[22] Sun, Z. *Satellite Networking: Principles and Protocols*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 2014.

[23] *Space systems – Space solar cells – Electron and proton irradiation test methods*. Standard. International Organization for Standardization, Feb. 2018, p. 9.

[24] Nikicio, A. N., Loke, W., Kamdar, H. and Goh, C. Radiation analysis and mitigation framework for LEO small satellites. - *2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*. 2017, pp. 59–66. DOI: 10.1109/COMNETSAT.2017.8263574.

[25] Vette, J. I. *The NASA/National Space Science Data Center trapped radiation environment model program, 1964 - 1991*. Tech. rep. M1: N–93-11003. 1991, p. 47.

[26] Barth, J. L., Dyer, C. S. and Stassinopoulos, E. G. *Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments*. ID: 1. 2003. DOI: 10.1109/TNS.2003.813131.

[27] Feynman, J., Spitale, G., Wang, J. and Gabriel, S. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 98 (1993), pp. 13281–13294. DOI: https://doi.org/10.1029/92JA02670.

[28] Feynman, J., Ruzmaikin, A. and Berdichevsky, V. The JPL proton fluence model: An update. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64 (Nov. 2002), pp. 1679–1686. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00118-9.

[29] *Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model*. Standard. International Organization for Standardization, June 2004, p. 6.

[30] Salzberger, M., Nömayr, C., Lugli, P., Messenger, S. R. and Zimmermann, C. G. Degradation fitting of irradiated solar cells using variable threshold energy for atomic displacement: Degradation fitting of irradiated solar cells. *Progress in photovoltaics* 25.9 (2017), pp. 773–781. DOI: 10.1002/pip.2888.

[31] Messenger, S. R., Jackson, E. M., Warner, J. H., Walters, R. J., Cayton, T. E., Chen, Y., Friedel, R. W., Kippen, R. M. and Reed, B. Correlation of Telemetered Solar Array Data With Particle Detector Data On GPS Spacecraft. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 58.6 (2011), pp. 3118–3125. DOI: 10.1109/TNS.2011.2172957.

[32] Boschini, M., Rancoita, P. G. ja Tacconi, M. *SR-NIEL Calculator: Screened Relativistic (SR) Treatment for Calculating the Displacement Damage and Nuclear Stopping Powers for Electrons, Protons, Light- and Heavy- Ions in Materials (version 7.5.2)*. 2014. URL: http://www.sr-niel.org/ (viitattu 16. 05. 2021).

[33] Agostinelli, S. et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003), pp. 250–303. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

[34] Berger, M., Coursey, J., Zucker, M. and Chang, J. *NIST Standard Reference Database 124*. 2017. DOI: https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P.

[35] Ziegler, J. F. *SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter*. URL: http://www.srim.org/index.htm (viitattu 16. 05. 2021).

[36] Polojärvi, V. and Polojärvi, V. *Novel III-V Heterostructures for High Efficiency Solar Cells: Studies of Electrical and Optical Properties*. 2016.

[37] Lang, D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics* 45.7 (1974). doi: 10.1063/1.1663719; 15, pp. 3023–3032. DOI: 10.1063/1.1663719.

[38] *Triple-Junction Solar Cell for Space Applications (CTJ30)*.

[39] *Silicon Solar Space Cell S 32*. Aug. 2016.

[40] *30% Triple Junction GaAs Solar Cell, Type: TJ Solar Cell 3G30C - Advanced, Large Area: 80mm x 80mm*. Aug. 2016.

[41] Gruginskie, N., Cappelluti, F., Bauhuis, G. J., Mulder, P., Haverkamp, E. J., Vlieg, E. and Schermer, J. J. Electron radiation-induced degradation of GaAs solar cells with different architectures. *Progress in photovoltaics* 28.4 (2020), pp. 266–278. DOI: 10.1002/pip.3224.

[42] Salzberger, M., Rutzinger, M., Nömayr, C., Lugli, P. and Zimmermann, C. G. Voltage-dependent photocurrent in irradiated GaAs solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26.5 (2018), pp. 317–323. DOI: https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1002/pip.2983.

[43] Meusel, M., Baur, C., Guter, W., Hermle, M., Dimroth, F., Bett, A. W., Bergunde, T., Dietrich, R., Kern, R., Köstler, W., Nell, M., Zimmermann, W., LaRoche, G., Strobl, G., Taylor, S., Signorini, C. and Hey, G. *Development status of European multi-junction space solar cells with high radiation hardness*. 2005.

[44] Duzellier, S., Nuns, T., David, J. P., Pons, C., Rey, R., Cavel, C. and Chanteperdrix, G. *Evaluation of tri-junction solar cells response to electrons and protons of the JUICE specific environment*. 2018. DOI: 10.1109/PVSC.2018.8548255.

[45] Hoheisel, R., Scheiman, D., Messenger, S., Jenkins, P. and Walters, R. *Detailed Characterization of the Radiation Response of Multijunction Solar Cells Using Electroluminescence Measurements*. 2015. DOI: 10.1109/TNS.2015.2498838.