



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Piikarbidi- ja galliumnitridipuolijohdetehokomponenttien tilannekartoitus

Current state of silicon carbide and gallium nitride semiconductor power components

Kati Kainulainen

Kandidaatintyö
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

22.11.2010

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO..... | 4 |
| 2 PIIKARBIDI JA GALLIUMNITRIDI MATERIAALEINA | 6 |
| 2.1 Piikarbidi materiaalina | 6 |
| 2.2 Galliumnitridi materiaalina | 8 |
| 3 VALMISTETTAVAT JA LÄHITULEVAISUUDEN KOMPONENTIT | 11 |
| 3.1 Piikarbidikomponentit..... | 11 |
| 3.1.1 Piikarbidi-schottky-diodi..... | 12 |
| 3.1.2 Piikarbidi-MOSFET | 15 |
| 3.1.3 Piikarbidi-JFET | 17 |
| 3.1.4 Piikarbidi-BJT | 20 |
| 3.1.5 Muita piikarbidikomponentteja | 21 |
| 3.2 Galliumnitridikomponentit..... | 23 |
| 3.2.1 Galliumnitridi-FET..... | 24 |
| 3.2.2 Galliumnitridi-schottky-barrier-diodi..... | 25 |
| 3.2.3 Galliumnitridi-HEMT | 25 |
| 3.2.4 Galliumnitridi-MOSFET | 26 |
| 4 TULEVAISUUDENNÄKYMÄT | 28 |
| 5 YHTEENVETO | 30 |
| LÄHTEET | 31 |
| LIITTEET..... | 38 |
| LIITE 1: Valmistettavien piikarbidikomponenttien taulukko | |
| LIITE 2: Valmistettavien galliumnitridikomponenttien taulukko | |

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|-----------|-------------------------------|
| <i>BV</i> | estojännite, blocking voltage |
| <i>E</i> | energia |
| <i>I</i> | virta |
| <i>U</i> | jännite |
| <i>P</i> | teho |
| <i>R</i> | resistanssi |
| <i>t</i> | aika, time |
| <i>T</i> | lämpötila, temperature |

Alaindeksit

| | |
|-----------|--|
| avg | keskiarvo |
| b | läpilyönti-, breakdown- |
| baseplate | pohjalevyyn viittaava |
| c | kapasitiivinen |
| case | koteloon viittaava |
| CB0 | kollektori-kanta-jännite (emitterivirta 0 A) |
| CE | kollektorin ja emitterin välinen arvo |
| CE0 | kollektori-emitteri-jännite (kantavirta 0 A) |
| D | nielu, drain |
| D(max) | maksimihäviö, dissipation |
| DC | tasavirta, Direct Current |
| DS | nielun ja lähteen välinen arvo, drain-source |
| DQ | staattinen nielu-, quiescent drain- |
| f | lasku, fall |
| F, fwd | myötäsuuntainen |
| GS | hilan ja lähteen välinen arvo, gate-source |
| IN | tulon suure |
| j | liitos, junction |
| max | suurin, maksimi |
| OFF | estotila |
| ON | johtavuustila |
| ON,s | kollektori-emitteri johtamistilassa |

| | |
|-----|---------------------------------|
| OUT | lähdön suure |
| r | nousu, rise |
| R | esto, reverse |
| RRM | estosuuntainen |
| s | kyllästys-, saturation- |
| sw | switching |
| tsw | kokonaisyhtä-, total switching- |
| T | kokonais-, total- |

Lyhenteet

| | |
|--------|---|
| AC | vaihtovirta, Alternating Current |
| AFRL | United States Air Force Research Laboratory |
| BJT | bipolaaritransistori, Bipolar Junction Transistor |
| C | hiili, Carbon |
| DC | tasavirta, Direct Current |
| EPC | Efficient Power Conversion Corporation |
| FET | Field Effect Transistor |
| Ga | gallium, Gallium |
| GaN | galliumnitridi, Gallium Nitride |
| GTO | Gate Turn-Off thyristor |
| HFET | Heterostructure Field Effect Transistor |
| HEMT | High electron mobility transistor |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| ISE | Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems |
| JFET | Junction Field Effect Transistor |
| LED | Light Emitting Diode |
| MESFET | Metal Semiconductor Field Effect Transistor |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| N | typpi, Nitrogen |
| PFC | Power Factor Correction |
| Si | pii, Silicon |
| SiC | piikarbidi, Silicon Carbide |

1 JOHDANTO

Energiankulutus maapallolla kasvaa jatkuvasti ja samalla ympäristön tila heikkenee. Jotta saavutettaisiin kestäviä parannuksia tilanteeseen, energia täytyisi käyttää tehokkaammin hyödyksi. Esimerkiksi teollisuudessa käytettävien sähkömoottoreiden nopeutta voitaisiin säätää entistä paremman hyötysuhteen omaavilla taajuudenmuuttajilla. Koska teollisuus käyttää sähköenergiasta suuren ja koko ajan kasvavan osan, on tehoelektroniikan alan kehitys tärkeässä asemassa näitä parannuksia tehtäessä. Komponenttien uusien materiaalivalintojen menestyksen myötä odotukset tehoelektroniikan kehittymiselle ovat nousseet.

Tehoelektroniikan komponenteilta vaaditaan mm. pieniä kytkentä- ja johtamistilan häviöitä sekä halpaa hintaa ja pientä fyysistä kokoa. Materiaalilla on suuri vaikutus saavutettavien komponentin ominaisuuksien kannalta, joten jo olemassa olevien materiaalien rinnalle etsitään jatkuvasti uusia tehoelektroniikan käyttöön sopivia materiaaleja, joilla on parempia ominaisuuksia. Aikaisemmin ja pääsääntöisesti edelleen puolijohdetehokytkimien materiaaleina on käytetty esimerkiksi piitä ja germaniumia, joiden ominaisuudet eivät aivan vastaa nykyajan kasvaneita tarpeita. Piistä valmistetun elektroniikan huonona puolena on ollut lämpökestoisuus ja sitä kautta huono suurien virtojen kestoisuus. Kuumuutta kestävä piikarbidi (SiC) on kehitetty korvaamaan piitä sovelluksissa, joissa tehoelektroniikan komponentit altistuvat lämmölle, säteilylle ja korkeille taajuuksille. Galliumnitridillä (GaN) puolestaan on havaittu olevan mm. korkea lämmönjohtavuus ja vapaiden varauksenkuljettajien tiheys, joiden vuoksi sen ominaisuudet ovat hyvät tehoelektroniikan puolijohteille.

Piikarbidin ja galliumnitridin käyttäminen tehoelektroniikan puolijohdemateriaaleina johtaa laitteiden hyötysuhteen paranemiseen ja niin energia saadaan käytetyksi tehokkaammin hyödyksi. Materiaalien korkean lämmönkeston vuoksi komponenttien jäähdytystarve pienenee ja siten laitteiden fyysistä kokoa saadaan pienemmäksi.

Työn tavoitteena on kartoittaa kahdesta melko uudesta tehoelektroniikassa käytettävästä materiaalista valmistettavien komponenttien kehitystilannetta ja saatavuutta. Toisin sanoen työssä selvitetään kyseisistä materiaaleista valmistettavien komponenttien ominaisuuksia ja valmistajia. Työ on luonteeltaan kirjallisuustutkimus.

Luvussa 2 esitellään piikarbidi ja galliumnitridi materiaaleina eli tarkastellaan niiden rakennetta ja ominaisuuksia. Luvussa 3 esitellään tällä hetkellä kaupallisesti valmistettavien sekä lähitulevaisuudessa julkaistavien piikarbidi- ja galliumnitridikomponenttien ominaisuuksia. Luvussa 4 puolestaan otetaan kantaa piikarbidista ja galliumnitridistä valmistettavien komponenttien ja niihin perustuvien laitteiden tulevaisuuden näkymiin. Luvussa 5 on yhteenveto ja liitteissä on esitetty taulukkomuodossa yksityiskohtaisemmin eri valmistajien komponentteja saatavilla olevine lukuarvoineen perustuen valmistajien datalehtiin.

2 PIIKARBIDI JA GALLIUMNITRIDI MATERIAALEINA

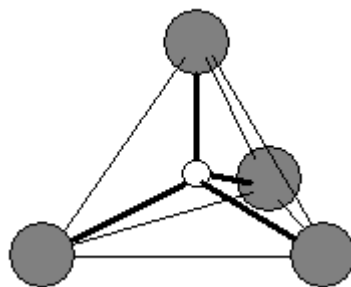
Materiaaleina piikarbidilla ja galliumnitridillä on kiderakenne, joka tarkoittaa atomien säännöllistä järjestäytymistä. Jos aine on kiteinen, sen atomit ovat järjestäytyneet hiloihin eli pienemmät kokonaisuudet toistuvat muodostaen hilarakenteen.

2.1 Piikarbidi materiaalina

Piikarbidi on erittäin kova puolijohdemateriaali, jota on jo yli sadan vuoden ajan käytetty hiontarvikkeissa ja sillä on myös tehoelektroniiikan komponenttien valmistuksen kannalta sopivat fysikaaliset ja sähköiset ominaisuudet. Piikarbidia pidetään erittäin lupaavana materiaalina ja sen käyttämisestä tehoelektroniiikan puolijohdemateriaalina onkin tutkimusta monissa maissa, kuten Yhdysvalloissa, Japanissa, Saksassa ja Suomessa. Nykyään piikarbidista valmistetaan jo kaupallisesti saatavilla olevia komponentteja.

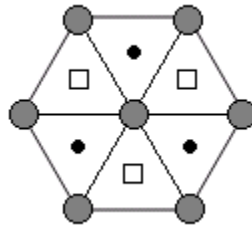
Piikarbidi on piin (Si) ja hiilen (C) keraaminen yhdiste, jota esiintyy hyvin harvoin luonnossa. Piikarbidilla on monia erilaisia kiderakenteita, joilla kaikilla on sama määrä piitä ja hiiltä, tosin kerrostuneena eri tavoin. Kiderakenteita on havaittu yli 200 kappaletta, joista yleisimmät ovat 3C, 6H ja 4H. Numero kiderakenteen nimessä osoittaa jaksollisuuden eli toistuvien atomikerrosten lukumäärän. Kirjaimista C tarkoittaa, että atomit ovat kuutiohilassa ja H kertoo atomien olevan heksagonisessa hilassa. (Linköpingin yliopisto 2010)

Hiili- ja piiatomit muodostavat kovalenttisten sidosten avulla nelikulmaisen rakenteen, joka on esitetty kuvassa 2.1. Kuvassa harmaa ympyrä kuvaa hiiliatomia ja valkoinen piiatomia.



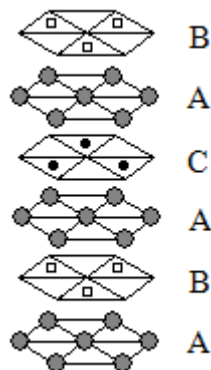
Kuva 2.1 Hiili- ja piiatomien muodostama nelikulmainen rakenne. Harmaa ympyrä kuvaa hiiliatomia ja valkoinen piiatomia. (Muokattu lähteestä Linköpingin yliopisto 2010)

Kuvasta 2.1 nähdään, että hiiliatomi sijaitsee rakenteen massakeskipisteessä. Hiiliatomin ja piiatomin väliseksi etäisyydeksi annetaan kirjallisuudessa 0,189 nm ja kahden piiatomin väliseksi etäisyydeksi 0,308 nm riippumatta kiderakenteesta. Kiderakenteiden välinen ero johtuu hiiliatomien sijoittumisesta erilaisiin nippujärjestyksiin, jonka eri tyyppejä kuvataan tässä kirjainten A, B ja C avulla. (Linköpingin yliopisto 2010) Kuvassa 2.2 on esitetty sijaintipaikat, joissa hiiliatomien täytyy olla, jotta eri nippujärjestykset toteutuvat. Kuvassa isommat ympyrät kuvaavat nippujen A-järjestystä, pienemmät ympyrät C-järjestystä ja neliöt B-järjestystä.



Kuva 2.2 Hiiliatomien sijaintipaikat, jotta eri nippujärjestykset toteutuvat. Isommat ympyrät kuvaavat nippujen A-järjestystä, pienemmät ympyrät C-järjestystä ja neliöt B-järjestystä. (Muokattu lähteestä Linköpingin yliopisto 2010)

Piikarbidin fysikaaliset ominaisuudet riippuvat kiderakenteesta ja tehoelektroniikan komponenttien valmistukseen parhaiten sopii 4H-kiderakenne, jonka nippujen järjestys on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 Piikarbidin 4H-kiderakenteen nippujen järjestys. (Muokattu lähteestä Linköpingin yliopisto 2010)

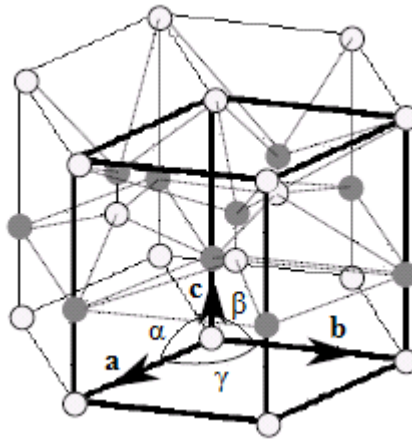
Kuvasta 2.3 nähdään, että 4H-piikarbidin nippujen perusjärjestys on ABAC, joka kertautuu ja muodostuu kiderakenne. Piikarbidin materiaaliominaisuuksiin kuuluu esimerkiksi lähes timanttia vastaava kovuus, joka johtuu pii- ja hiiliatomien välisestä erittäin lujasta elektronisidoksesta. Lisäksi kuparia vastaava lämmönjohtavuus, säteilyn sieto sekä korkea käyttölämpötila ja sulamispiste ovat piikarbidin ominaisuuksia. (Linköpingin yliopisto 2010)

Vaikeutena piikarbidin käyttämisessä on puhtaan ja virheettömän yksikiteisen piikarbidin valmistaminen. Lisäksi piikarbidin kasvatusta on hidasta, minkä vuoksi hinta kohoaa. Piikarbidia kasvatetaan kiteeksi yleensä suoraan kaasufaasista, koska nestefaasista kasvattaminen on hyvin vaikeaa ja kallista. (Linköpingin yliopisto 2010)

2.2 Galliumnitridi materiaalina

Japanilainen Shuji Nakamura on galliumnitriditeknologian merkittävimpiä keksijöitä ja hän julkaisi vuonna 1993 ensimmäiset galliumnitridistä valmistetut LED:t (*Light Emitting Diode*) sekä sen jälkeen sinivaloisen puolijohdelaserin. Nykyään galliumnitridistä valmistettuja LED:eja käytetään esimerkiksi liikennevaloissa. (Tek 2006)

Materiaalina galliumnitridi on galliumin (Ga) ja typen (N) yhdiste ja sillä on wurziittikidehila. Ryhmän III alkuaineiden, kuten gallium, ja typen (ryhmä V) muodostamat alkuaineet ovat järjestäytyneet lähes poikkeuksetta heksagoniseen wurziittihilaan, joka on esitetty kuvassa 2.4. Heksagoninen hila koostuu kuvassa kolmesta alkeiskopista, joista yksi on piirretty tummemmalla viivalla. Lisäksi kuvaan on merkitty kantavektorit **a**, **b** ja **c** sekä kantavektoreiden väliset kulmat α , β ja γ . (Sintonen 2009)



Kuva 2.4 Heksagoninen rakenne. Kuvaan on piirretty tummemmalla viivalla yksi alkeiskoppi ja merkitty kantavektorit **a**, **b** ja **c** sekä kantavektoreiden välisen kulmat α , β ja γ . (Muokattu lähteestä Sintonen 2009)

Kantavektoreilla **a**, **b** ja **c** on tietyt pituudet riippuen heksagonisesta III-N yhdisteestä (esim. GaN). Galliumnitridillä kantavektoreiden **a** ja **b** välinen kulma on $\gamma = 120^\circ$, vektoreiden **a** ja **c** välinen kulma $\alpha = 90^\circ$ ja vektoreiden **b** ja **c** välinen kulma $\beta = 90^\circ$. (Sintonen 2009)

Galliumnitridi on sopiva tehoelektronikan komponenttien materiaaliksi, koska sillä on korkea lämmönjohtavuuden arvo. Muita galliumnitridistä hyviä tekeviä fysikaalisia ominaisuuksia ovat sen kriittisen läpilyöntikentän, liikkuvuuden ja varauksenkuljettajan pitoisuuden hyvät arvot. (Mark et al. 2009) Taulukossa 1 on vertailtu tehoelektronikan komponenttien valmistukseen käytettävien materiaalien (pii, piikarbidi ja galliumnitridi) ominaisuuksia.

Taulukko 1. Tehoelektronikan komponenttien valmistukseen käytettävien materiaalien ominaisuuksien vertailua. (Mark et al. 2009)

| | Si | 4H-SiC | GaN (epi) | GaN (bulk) |
|-------------------------------------|------|--------|-----------|------------|
| Kielletty energiavyö -energia [eV] | 1,12 | 3,26 | 3,4 | 3,4 |
| Eristevakio [rel] | 11,9 | 10,1 | 9 | 9 |
| Kriittinen läpilyöntikenttä [MV/cm] | 0,25 | 2,2 | 2 | 3,3 |
| Lämmönjohtavuus [W/mK] | 150 | 370 | 130 | 230 |
| Elektronien liikkuvuus | 1500 | 1000 | 1250 | 1250 |

Taulukosta 1 nähdään, että galliumnitridi on hyvin vertailukelpoinen lämmönjohtavuuden ja kriittisen läpilyöntikentän arvoissa. Käyttämällä galliumnitridiä, jolla on virheetön puolijohteen homogeeninen sisusta (bulk), saadaan lämmönjohtavuus 130 W/mK nousemaan arvoon 230 W/mK. Siten galliumnitridin sopivuus tehoelektronikan käyttösovelluksiin

kasvaa. Kriittisen läpilyöntikentän arvolla on oleellinen merkitys tehoelektroniiikan puolijohdekomponenttien resistiivisten häviöiden ja kytkentähäviöiden kannalta. Taulukosta 1 nähdään, että galliumnitridillä on suurin kriittisen läpilyöntikentän arvo. (Mark et al. 2009)

Taulukosta nähdään lisäksi, että piikarbidilla ja galliumnitridillä on suuri kielletyn energiavyön arvo eli puolijohteen johtavuus- ja valenssivyön välisen etäisyyden arvo energiassa mitattuna. Tämä ominaisuus mahdollistaa piikarbidista ja galliumnitridistä valmistettujen laitteiden toimimisen hyvin korkeammissa lämpötiloissa kuin esimerkiksi piistä valmistettujen. Suuren kielletyn energiavyön arvon ansiosta voidaan tuottaa tehotransistoreja, jotka estävät korkeita jännitteitä ja joilla on pieni sarjaresistanssi. Tämä johtaa pieniin johtavuushäviöihin, jotka puolestaan mahdollistavat komponentin pienemmän fyysisen koon ja pienemmät kytkentähäviöt. (Transic 2010)

3 VALMISTETTAVAT JA LÄHITULEVAISUUDEN KOMPONENTIT

Tässä luvussa esitellään tällä hetkellä kaupallisesti valmistettavien sekä lähitulevaisuudessa julkaistavien piikarbidi- ja galliumnitridikomponenttien ominaisuuksia valmistajien datalehtien tietoihin perustuen. Lisäksi esitellään joitakin tutkimuksia, jotka antavat lisätietoa komponenteista. Liitteissä on esitelty yksityiskohtaisemmin eri valmistajien komponentteja saatavilla olevine lukuarvoineen.

3.1 Piikarbidikomponentit

Zukin (2008) mukaan piikarbidia voidaan käyttää diodien, schottky-diodien, JFET:ien (*Junction Field Effect Transistor*), MESFET:ien (*Metal Semiconductor Field Effect Transistor*), BJT:ien (*Bipolar Junction Transistor*), MOSFET:ien (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ja IGBT:ien (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) valmistukseen. Roos (2010) kuitenkin kirjoittaa artikkelissaan, että schottky-diodit ovat tällä hetkellä ainoita suurissa määrissä valmistettavia piikarbidikomponentteja. Myös JFET:eja valmistetaan, vaikkakaan niiden suosio ei yllä vielä samaan luokkaan. Roosin haastatteleman IMS Researchin Josh Floodin mukaan vuoden 2010 aikana Cree aikoo esitellä piikarbidi-MOSFET:in ja Transic piikarbidi-BJT:in. Vuonna 2011 Infineon Technologies puolestaan julkaisee JFET:in. (Roos 2010) Taulukossa 2 on esitetty eri valmistajien piikarbidikomponentteja keskeisine lukuarvoineen. Taulukon 2 komponenteista on kerrottu tarkempia tietoja seuraavissa alakappaleissa ja liitteessä 1.

Taulukko 2. Eri valmistajien piikarbidikomponentteja virta- ja jännitearvoineen.

| valmistaja komponentti | virta [A] | jännite [V] |
|---|---|---|
| Cree | | |
| schottky-diodi CPW3-1700S010 | $I_{F(AVG)} = 10 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 1700 \text{ V}$ |
| schottky-diodi C3D20060D | $I_{F(AVG)} = 20 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 600 \text{ V}$ |
| Infineon Technologies | | |
| schottky-diodi SDP04S60 | $I_F = 4 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 600 \text{ V}$ |
| 3G schottky-diodi IDD12SG60C | $I_F = 12 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 600 \text{ V}$ |
| pii-schottky-diodi BAT64... | $I_F = 250 \text{ A}$ | $U_R = 40 \text{ V}$ |
| Semisouth Laboratories, Inc. | | |
| JFET SJEP170R550 | $I_D = 3 \text{ A @ } T_j = 175 \text{ °C}$ | $BV_{DS} = 1700 \text{ V}$ |
| JFET SJDP120R085 | $I_D = 43 \text{ A @ } T_j = 150 \text{ °C}$ | $BV_{DS} = 1200 \text{ V}$ |
| schottky-diodi SDP30S120 | $I_F = 30 \text{ A}$ | $V_{DC} = 1200 \text{ V}$ |
| United Silicon Carbide | | |
| schottky-diodi 25A | $I_F = 25 \text{ A @ } T_j = 175 \text{ °C}$ | $U_{RRM} = 1200 \text{ V}$ |
| schottky-diodi 40A | $I_F = 40 \text{ A @ } T_j = 175 \text{ °C}$ | $U_{RRM} = 1200 \text{ V}$ |
| JFET | $I_D = 30 \text{ A @ } T_j = 175 \text{ °C}$ | $U_{DS} = 600 \text{ V}$ |
| BJT 600V | $I_C = 10 \text{ A}$ | $U_{CBO} = 600 \text{ V}$ |
| BJT 1200V | $I_C = 10 \text{ A}$ | $U_{CBO} = 600 \text{ V}$ |
| Transic | | |
| BJT BitSiC BT1206AB-P1 ($T_{j(max)} = 250 \text{ °C}$) | $I_C = 6 \text{ A}$ | $U_{CE0} = 1200 \text{ V}$ $U_{CE,s} = 1 \text{ V}$ |
| BJT BitSiC BT1206AC-P1 ($T_{j(max)} = 150 \text{ °C}$) | $I_C = 6 \text{ A}$ | $U_{CE0} = 1200 \text{ V}$ $U_{CE,s} = 0,75 \text{ V}$ |
| BJT BitSiC BT1220AB-P1 ($T_{j(max)} = 250 \text{ °C}$) | $I_C = 20 \text{ A}$ | $U_{CE0} = 1200 \text{ V}$ $U_{CE,s} = 1 \text{ V}$ |
| BJT BitSiC BT1220AC-P1 ($T_{j(max)} = 150 \text{ °C}$) | $I_C = 20 \text{ A}$ | $U_{CE0} = 1200 \text{ V}$ $U_{CE,s} = 0,75 \text{ V}$ |
| GeneSiC Semiconductor | | |
| barrier-schottky-tasasuuntain | $I_F = 2 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 1200 \text{ V}$ |
| Powerex | | |
| MOSFET QJD1210006-moduuli | $I_D = 100 \text{ A @ } T_j = 150 \text{ °C}$ | $U_{DS} = 1200 \text{ V}$ |
| MOSFET QJD1210007-moduuli | $I_D = 100 \text{ A @ } T_j = 150 \text{ °C}$ | $U_{DS} = 1200 \text{ V}$ |

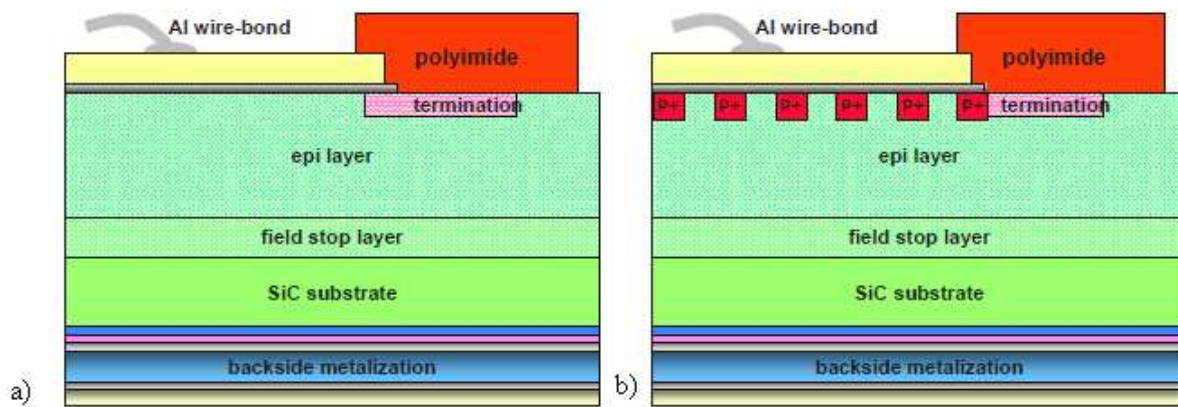
3.1.1 Piikarbidi-schottky-diodi

Tehoschottky-diodeilta halutaan matalaa läpilyöntijännitettä ja korkeaa päästövirtaa, joihin päästään käyttämällä valmistuksessa leveän taajuusalueen (engl. wide band-gap) materiaaleja kuten piikarbidia ja galliumnitridiä. Infineon Technologies on valmistanut vuodesta 2001

lähtien piikarbidista tehtyjä 300 V ja 600 V schottky-diodeita. Vuodesta 2001 lähtien Cree Inc. on valmistanut schottky-diodeita, joilla on 1,2 kV estojännite. (Zarebski & Dabrowski 2008)

Infineon Technologies valmistaa piikarbidista schottky-diodeita ja SDP04S60-komponentin datalehdellä yhtiö kertoo, ettei kyseisellä schottky-diodilla ole esto- eikä päästösuunnan toipumista eikä lämpötila vaikuta kytkentäkäyttäytymiseen (Infineon Technologies 2008). Infineon Technologies on alkanut valmistaa myös kolmannen sukupolven schottky-diodeita (Infineon Technologies 2010).

Zeng (2009) kuvailee Infineon Technologiesin raportissa piikarbidista valmistettujen schottky-diodien ominaisuuksia. Hänen mukaansa niin sanotun ensimmäisen sukupolven piikarbidischottky-diodit ovat herkkiä syöksyvirrälle (engl. surge current) ja ylijännitepiikeille, mutta toisen ja kolmannen sukupolven komponentit kestävät syöksyvirtaa. Kuvan 3.1 a-kohdassa on esitetty ensimmäisen sukupolven schottky-diodi ja b-kohdassa toisen ja kolmannen sukupolven komponentteja kuvaavat poikkileikkaukset.



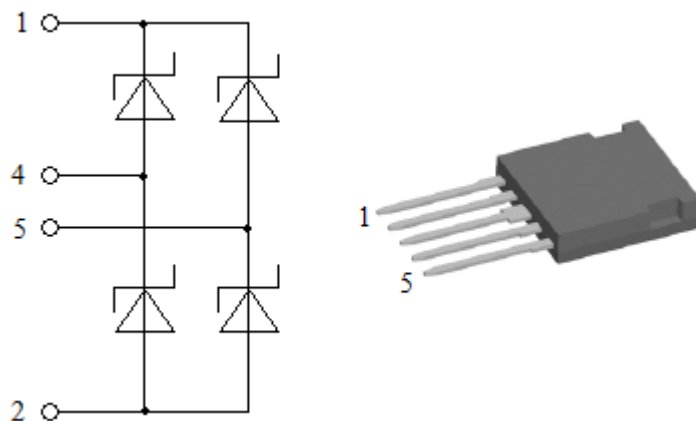
Kuva 3.1 a) Ensimmäisen sukupolven schottky-diodia kuvaava ja b) toisen ja kolmannen sukupolven komponenttia kuvaava poikkileikkaus (Zeng 2009, s. 45).

Toisen ja kolmannen sukupolven komponentit yhdistävät perinteisen schottky-diodin ja pn-diodin parhaita ominaisuuksia, mikä näkyy kuvassa 3.1 b) p+ -saarekkeina. Zengin mukaan Infineon Technologiesin kolmannen sukupolven schottky-diodeilla on pienempi liitoksen ja kotelon välinen lämpöresistanssi ohuen juotostekniikan ansiosta. Myös kapasitiivinen varaus Q_C on pienempi käytettäessä kolmannen sukupolven komponentteja, mikä mahdollistaa korkeamman kytkentätaajuuden käyttämisen. Lisäksi Infineon Technologies lupaa näiden

uusien kolmannen sukupolven komponenttien olevan hyvin luotettavia ja kestäviä sekä leviävän laajaan käyttöön halvemman hinnan ansiosta. (Zeng 2009)

Semisouth Laboratories, United Silicon Carbide ja Cree valmistavat schottky-diodeita, joiden maksimitoimintalämpötila $T_j = 175 \text{ °C}$ eli sama kuin Infineon Technologiesin valmistamilla schottky-diodeilla. Muutoinkin näiden valmistajien schottky-diodien ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset (ks. Liite 1).

Genesis Semiconductor kehittää barrier-schottky-tasasuuntaajia ja esimerkiksi GA02SHT12-220-komponentin maksimitoimintalämpötilaksi annetaan alustavassa datalehdessä $T_j = 225 \text{ °C}$, joka on korkeampi kuin muiden valmistajien lämpötila. (Genesis Semiconductor 2010 a) Ixys puolestaan valmistaa piikarbidi-schottky-diodeista valmistettua tasasuuntaajaa, jonka nimi on FBS10-06SC (Ixys 2008). Kuvassa 3.2 on esitetty vasemmalla puolella Ixyksen FBS10-06SC-piikarbidi-schottky-dioditasasuuntaajasilta ja oikealla puolella komponentin kotelopiirros.



Kuva 3.2 Ixyksen FBS10-06SC-piikarbidi-schottky-dioditasasuuntaajasilta ja komponentin kotelopiirros. Numerot kuvaavat pinnijärjestystä. (Muokattu lähteestä Ixys 2008)

Kuvassa 3.2 esitetyn komponentin datalehden mukaan tasasuuntaajaa voidaan käyttää korkeataajuisissa sovelluksissa. (Ixys 2008) Cree puolestaan julkaisi vuoden 2010 alkupuolella markkinoiden ensimmäisen Z-RecTM liitosraja (Junction Barrier) schottky-diodisirun. Diodin estosuuntainen jännitekesto on 1700 V. (Cree 2010)

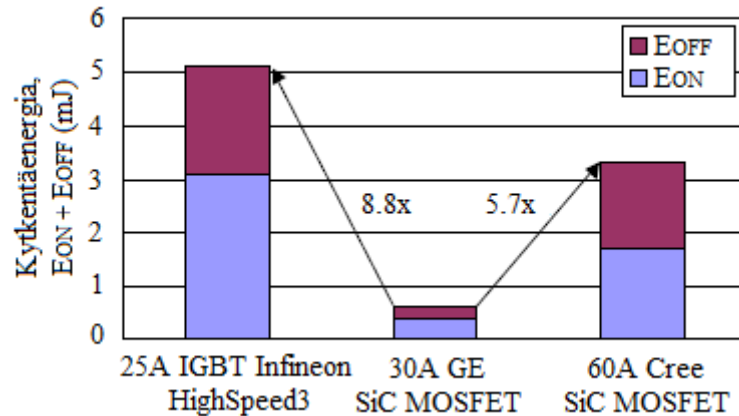
3.1.2 Piikarbidi-MOSFET

Piikarbidi-MOSFET:t ovat lupaavia korkeataajuisiin sovelluksiin matalien johtavuustilan häviöidensä, korkeiden kytkentänopeuksiensa ja korkean lämpötilavakautensa ansiosta. Powerex Inc. esitteli vuonna 2009 kaksi piikarbidi-MOSFET-moduulia (QJD1210006 ja QJD1210007), jotka on kehitetty yhteistyössä Creen ja USA:n ilmavoimien tutkimuslaboratorion, AFRL:n (*United States Air Force Research Laboratory*), kanssa. Powerexin mukaan moduulit toimivat korkeissa lämpötiloissa ja verrattuna pii-MOSFET:eihin perustuviin moduuleihin uudella piikarbidi-MOSFET-moduulilla on 38 % pienemmät johtamistilan häviöt ja 60 % pienemmät kytkentähäviöt 20 kHz taajuudella. Moduuleissa käytetään piikarbidi-schottky-diodeita. (Bandieramonte 2009)

QJD1210006-komponentin datalehden mukaan moduulit on suunniteltu käytettäväksi korkeataajuisissa sovelluksissa. Yhdessä moduulissa on kaksi piikarbidi-MOSFET:ia, joista kummallakin on piikarbidi-schottky-diodi. Liitoksen maksimilämpötilaksi annetaan $T_j = 200$ °C. QJD1210006- ja QJD1210007-komponenttien välillä on eroa schottky-diodin estosuuntaisen virran arvossa. QJD1210006-komponentilla diodin estosuuntainen virta $I_{R(\max)} = 5000$ μA ja QJD1210007-komponentilla $I_{R(\max)} = 10000$ μA , kun $T_j = 150$ °C. (Powerex 2010 a,b)

Yllä mainittu Creen laitteiden ja Powerexin pakkausteknologian yhdistäminen johtaa pienempiin ja kevyempiin laitteisiin, joiden jäähdytystarve on pienempi. Creen lehdistöjulkaisussa haastateltu John Palmour uskoo uusien piikarbidi-MOSFET:ien hyvän hyötysuhteen tuovan energiansäästöä aurinkosähkövaihtosuuntaajissa ja teollisuuden sähkökäytöissä sekä hybridi- ja sähköajoneuvoissa. (Cree 2009)

Stevanovic & al. (2010) mukaan pii-IGBT:n korvaajaksi piikarbidikomponenteista sopii parhaiten piikarbidi-MOSFET, joka tuo pienemmät häviöt ja toimii korkeammassa lämpötiloissa. General Electric Company onkin kehittänyt piikarbidi-MOSFET:ia, jonka tutkimisesta Stevanovic & al. yhtiön omassa raportissa kertoo. Kytkentätesteissä on vertailtu Infineon Technologiesin 25 A IGBT:tä, General Electric Companyn piikarbidi-MOSFET:a ja Creen 60 A piikarbidi-MOSFET:a. (Stevanovic & al. 2010) Kuvassa 3.3 on esitetty kytkentähäviöiden mittaustulokset.

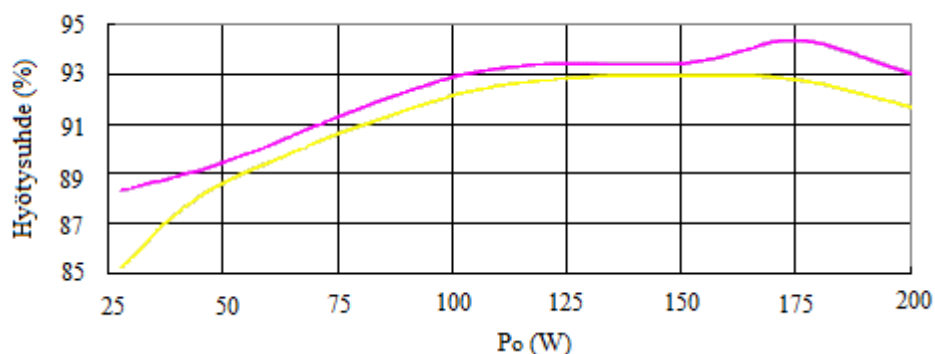


Kuva 3.3 General Electric Companyn saamat tulokset Infineon Technologiesin 25 A IGBT:n, General Electric Companyn piikarbidi-MOSFET:n ja Creeen 60 A piikarbidi-MOSFET:n kytkentäenergiähäviöiden vertailussa. (Muokattu lähteestä Stevanovic & al. 2010, s. 404)

Kuvasta 3.3 nähdään, että mittauksissa General Electric Companyn piikarbidi-MOSFET:lla oli kilpailevien yritysten komponentteihin verrattuna 5,7–8,8 kertaa pienemmät kytkentähäviöt: $E_{ON} = 0,35$ mJ ja $E_{OFF} = 0,24$ mJ. Testiolosuhteet olivat 30 A, 600 V, 175 °C. (Stevanovic & al. 2010) Tutkimus oli General Electricin oma, joten tulokset eivät ole täysin objektiiviset.

Pii-MOSFET:n ja piikarbidi-MOSFET:in hyötysuhteen vertailua

Palmour (2006) kirjoittaa artikkelissaan pii-MOSFET:n ja piikarbidi-MOSFET:n vertailusta. Kuvassa 3.4 on esitetty Infineon Technologiesin piipohjaisen CoolMos-transistorin ja piikarbidi-MOSFET:n hyötysuhteen vertailua, kun MOSFET:n pariin asetetaan piikarbidi-schottky-diodi.



Kuva 3.4 Infineon Technologiesin piipohjaisen CoolMos-transistorin (keltainen viiva) ja piikarbidi-MOSFET:n (punainen viiva) hyötysuhteen vertailua tehon funktiona, kun MOSFET:n pariin asetetaan piikarbidi-schottky-diodi. (Muokattu lähteestä Palmour 2006)

Palmourin mukaan kuvasta 3.4 nähdään, että korkeilla ulostulojännitteillä piikarbidi-MOSFET:lla saadaan 1,6 % parannus hyötysuhteeseen eli 22 % pienemmät häviöt. Palmourin mukaan se tarkoittaa, että piikarbidi-PFC (power factor correction)-ratkaisun häviöt verrattuna piipohjaiseen ratkaisuun pienenevät kokonaisuudessaan 47 %. (Palmour 2006)

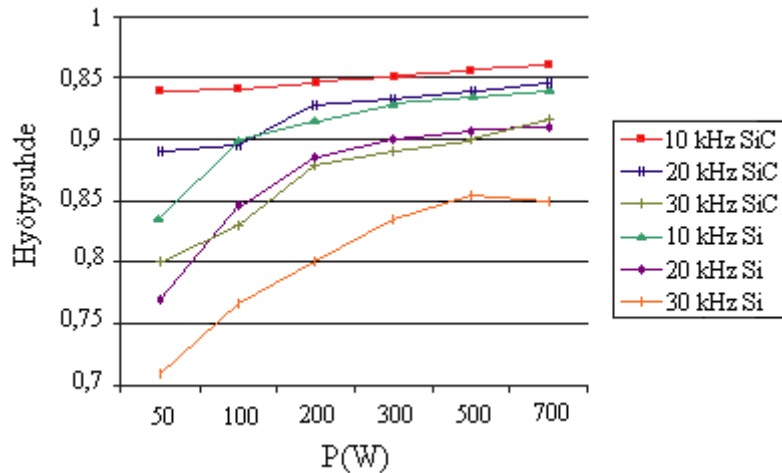
3.1.3 Piikarbidi-JFET

Yhdysvaltalainen Semisouth Laboratories, Inc. on kunnostautunut erityisesti piikarbidi-JFET:ien kehittämisessä ja valmistamisessa ja vuonna 2008 tuotiin markkinoille ensimmäinen komponentti. Yhtiö julkaisi 30.4.2010 kaksi uutta piikarbidi-JFET:ia. Toinen niistä (SJEP170R550) on estojännitteeltään 1700 V:n avausmuotoinen (*normally-off*) transistori ja tarkoitettu erityisesti moottorikäyttöjen lisäteholähteiden markkinoille. Toisella julkaistulla piikarbidi-JFET:lla (SJDP120R085) on 1200 V estojännite ja se on kehitetty avausmuotoisen edeltäjänsä rinnalle sulkutyypiseksi (*normally-on*) parannelluin ominaisuuksin. (Semisouth 2010)

Myös United Silicon Carbide on tuonut markkinoille piikarbidi-JFET:n ja sen nielu-lähde -jännite on 600 V. Komponentin alustavassa datalehdessä sanotaan, että JFET:lla on matala nielu-lähde-resistanssi $R_{DS(ON)}$, jonka luvataan parantavan DC-DC-kytkinsovelluksien hyötysuhdetta. Nielu-lähde-resistanssi ei riipu lämpötilasta, mikä mahdollistaa erittäin nopean kytkentätaajuuden. Tyypillisiä käyttökohteita ovat mm. moottorikäytöt, induktiokuumennus, tehokerroinkorjausmodulit ja DC-DC-muuntimet. (United Silicon Carbide 2010 a)

Vaihtosuuntaajan hyötysuhde paranee käyttämällä piikarbidi-JFET:eja

Pan et al. esittää julkaisussaan korkea-taajuuksisen ja korkeahyötysuhteisen vaihtosuuntaajan kehitystä käyttäen piikarbidi-JFET:a. Heidän simulaationsa ja tutkimuksensa osoittavat, että piikarbidi-JFET:lla on lyhyet turn-on- ja turn-off-ajat, joiden ansiosta kytkentähäviöt ovat pienemmät kuin, jos käytettäisi pii-IGBT:eja. Lisäksi Pan sai tulokseksi, että piikarbidi-JFET:in perustuvalla vaihtosuuntaajalle (1 kW, 200 V) saadaan 3 % suurempi hyötysyhte, kun käytetään pii-IGBT:ien tilalla piikarbidi-JFET:eja. Kuvassa 3.5 on esitetty Panin kokeellisessa tutkimuksessa saamat tulokset piikarbidi-JFET:iin perustuvan ja pii-IGBT:iin perustuvan vaihtosuuntaajan hyötysuhteelle.



Kuva 3.5 Piikarbidi-JFETiin perustuvan ja pii-IGBTiin perustuvan vaihtosuuntaajan hyötysuhteiden vertailua. Vaaka-akselilla on teho watteina ja pystyakselilla hyötysuhde. (Muokattu lähteestä Pan et al. 2009, s. 2560)

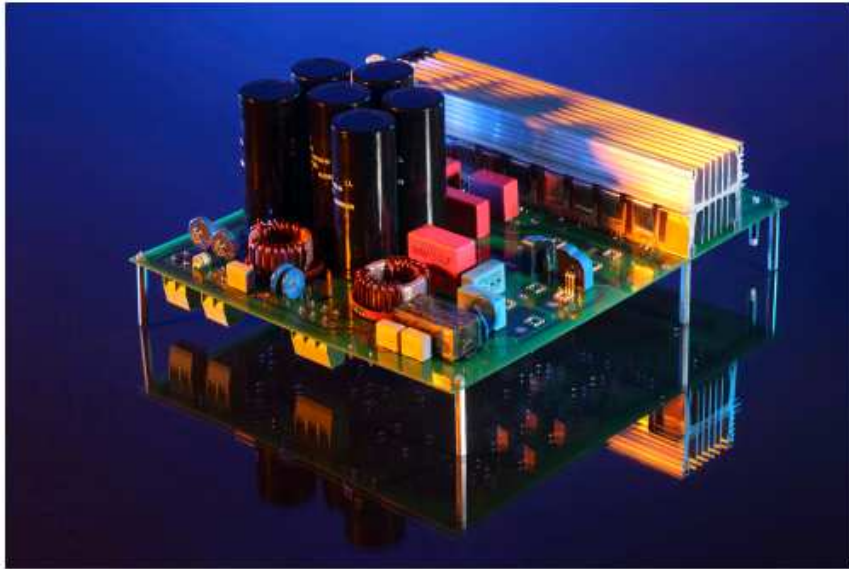
Kuvasta 3.5 nähdään, että piikarbidi-JFET:iin perustuvalla vaihtosuuntaajalla on 94 % hyötysuhde 20 kHz kytkentätaajuudella tehon ollessa 200 W. Pii-IGBT:lla puolestaan on samalla kytkentätaajuudella vain 90 % hyötysuhde. Kuvasta nähdään lisäksi, että kytkentätaajuuden kasvaessa kasvaa myös piikarbidi-JFET:n ja pii-IGBT:n hyötysuhteiden välinen ero.

Panin tutkimuksessa selvisi myös, että pii-IGBT:lla on suuri estosuunnan toipumisvirta (reverse recovery current). Käytettäessä piikarbidi-JFET:n passiivista diodia tai anti-parallel piikarbidi-schottky-diodia, estosuunnan toipumisvirta parani huomattavasti. Piikarbidi-diodilla on kuitenkin paljon suurempi jännitteenalenema kuin piikarbidi-schottky-diodilla, joten kannattaa valita piikarbidi-schottky-diodi piikarbidi-JFET:n kanssa. (Pan et al. 2009) Pii-IGBT:n ja pii-JFET:n väliseen hyötysuhde-eroon ei otettu kantaa, joten piikarbidin vaikutusta siltä osin ei tässä työssä esitetä.

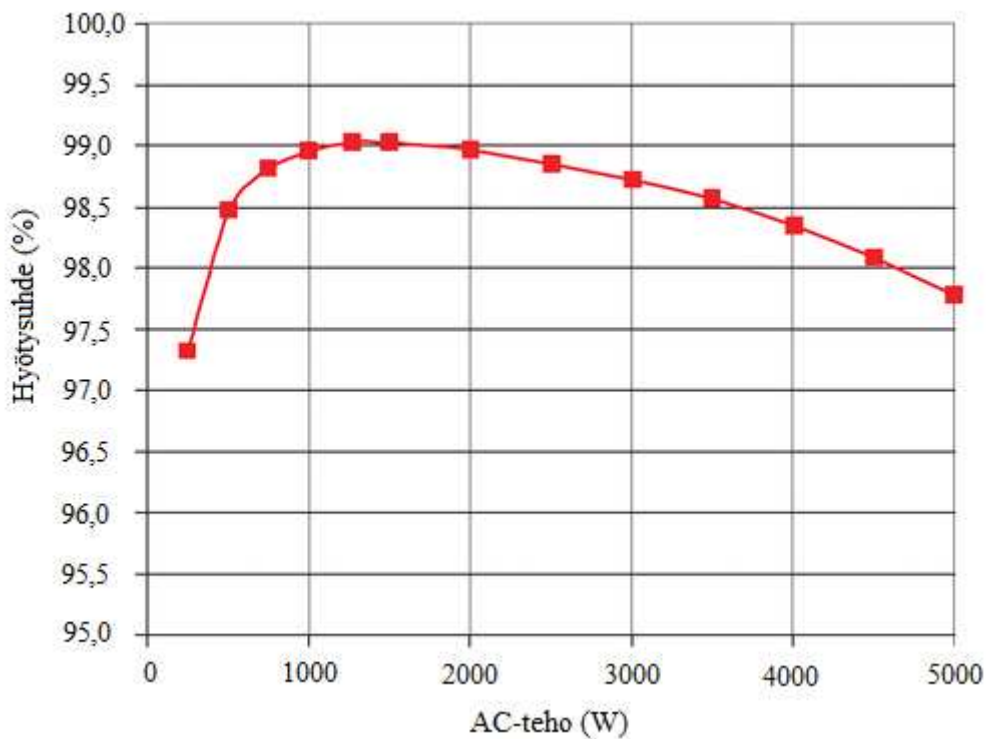
Hyötysuhteen maailmanennätys käyttämällä piikarbidi-JFET:eja

Fraunhoferin aurinkoenergiaan keskittyvä instituutti Fraunhofer ISE (*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*) tekee tutkimusta energian toimittamisesta tehokkaasti ja luontoa huomioiden (Fraunhofer ISE 2010). Instituutti teki vuonna 2009 aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen maailmanennätyksen, joka on nyt 99,3 %. Ennätys mitattiin aurinkosähkövaihtosuuntaajalla, jolla oli sisäinen tehollähde, digitaalinen signaaliprosessori ja LCL-suodatin. Fraunhofer ISE:n lehdistötiedotteessa kerrotaan

ennätyksessä käytettäneen piikarbidi-JFET:ejä, joiden valmistaja oli SemiSouth Laboratories Inc. Piikarbidikomponentit olivat pääroolissa ennätyksen syntymisen kannalta. (Fraunhofer ISE 2009) Kuvassa 3.6 on esitetty vaihtosuuntaaja, jolla maailmanennätys tehtiin ja kuvassa 3.7 mitattu hyötysuhde tehon funktiona.



Kuva 3.6 Vaihtosuuntaaja, jolla maailmanennätysyhyötysuhde 99,3 % tehtiin. (Fraunhofer ISE 2009)



Kuva 3.7 Mitattu hyötysuhde tehon funktiona. (Muokattu lähteestä Fraunhofer ISE 2009).

Kuvasta 3.7 nähdään, että 99,3 % hyötysuhde saavutetaan tehon ollessa noin 1300 W. Fraunhofer ISE:n lehdistötiedotteessa sanotaan myös, että mitä suurempi vaihtosuuntaajan hyötysuhde on, sitä parempi tuotto saadaan. Esimerkiksi 30 kW järjestelmässä hyötysuhteen kasvaessa 1 %, saadaan kymmenen vuoden aikana tuottoa 3000 kW tai rahallisesti ilmaistauna 1300 euroa. (Fraunhofer ISE 2009) Laskelmissa ei ole otettu huomioon vaihtosuuntaajan hankintakustannuksia. Piikarbidikomponentit ovat vielä huomattavasti kalliimpia kuin piikkomponentit, joten saavutettu suurempi tuotto voi näkyä suurempina alkuinvestointeina.

3.1.4 Piikarbid-BJT

Ruotsalainen TranSiC ja yhdysvaltalainen United Silicon Carbide kehittävät piikarbidista bipolaaritransistoreja (*BJT*). TranSiCin mukaan piikarbidista valmistetuilla bipolaaritransistoreilla on pienet johtavuus- ja kytkentähäviöt sekä korkea estojännite, toimintalämpötila ja syöksyvirran kesto. TranSiC lupaa BJT:n käynnistysviiveen olevan lähes olematon ja kytkentämuutosten nopeita.

TranSiC:lla on kahdenlaisia BJT-tuotteita, jotka erotellaan lämpötilakestoisuutensa perusteella. Ne ovat 150 °C:een ja 250 °C:een kestoisuudet. Esimerkiksi BitSiC BT1206AB-P1 -transistorin maksimiliitoslämpötilaksi annetaan datalehdellä $T_j = 250\text{ °C}$ ja transistorin tyypillisiksi sovelluskohteiksi luetellaan mm. korkean lämpötilan DC/DC-muunnin ja AC/DC-vaihtosuuntaaja. Öljyyn-, kaasuun- sekä ilmakehään ja avaruuteen liittyvät teollisuuden alat ovat näiden transistorien mahdollisia käyttökohteita. Kuvassa 3.8 on esitetty BitSiC BT1206AB-P1 -transistorin kotelo, jossa luku 1 merkitsee transistorin kanta-, luku 2 emitteri ja luku 3 kollektoripinniä.



Kuva 3.8 TranSiC:in BitSiC BT1206AB-P1 -transistorin kotelo (TO-258), jossa luku 1 merkitsee transistorin kanta-, luku 2 emitteri- ja luku 3 kollektoripinniä. (Lindgren 2010)

BitSiC BT1206AC-P1-transistori puolestaan omaa 150 °C lämpötilakestoisuuden, mutta sen kilpailuvaltti on korkea hyötysuhde. Kyseisen komponentin datalehdeltä ilmenee, että komponentti sopii käytettäväksi tehoelektroniikan sovelluksissa, joissa vaaditaan hyvää hyötysuhdetta ja puolijohteiden korkeaa virrantiheyttä. (TranSiC 2010) Lindgrenin mukaan yhtiö myy kaikista tuotteistaan vielä vain näytekomponentteja, mutta on nostamassa tuotantovolyymejaan (Lindgren 2010).

United Silicon Carbide valmistaa 600 V ja 1200 V BJT:eja, joiden molempien lämpötilakestoisuus on $T_j = 175$ °C. Datalehdillä komponenttien tyypillisiksi sovelluskohteiksi luetellaan samoja kuin TranSiC:lla eli DC/DC-muunnin ja AC/DC-vaihtosuuntaaja. (United Silicon Carbide 2010 b, c)

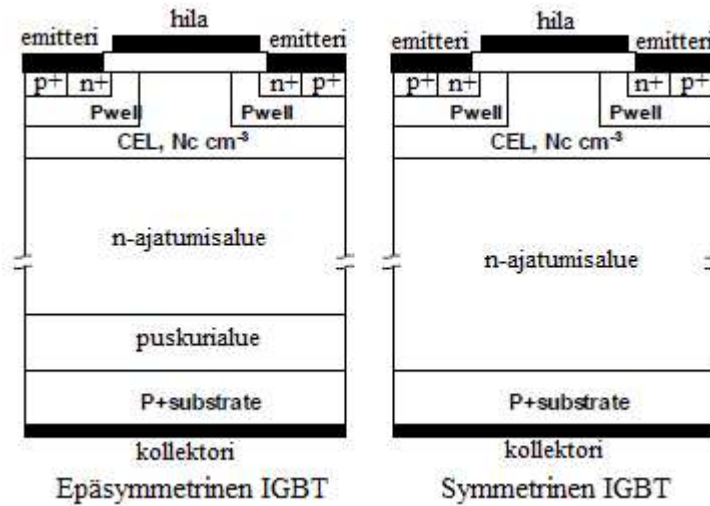
3.1.5 Muita piikarbidikomponentteja

Walden & Cooperin (2009) mukaan *piikarbidityristoreja* on kehitetty useiden vuosien ajan, mutta raportoitu on vain yksi yli 4 kV estojännitteen tyristori. He ovat kirjoittaneet 8 kV ja 20 kV piikarbidityristorien valmistamisesta. (Walden & Cooper 2009) Tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevista piikarbidityristoreista ei vielä löydy mainintoja. Genesis Semiconductor aikoo julkaista pian piikarbidista valmistettuja tyristoreita (Genesis Semiconductor 2010 b).

Agarwal et al. (2008) mukaan *piikarbid-GTO (Gate Turn-Off)*-tyristoreja kehitetään erittäin korkeajännitteisiin sovelluksiin, kuten vikavirran rajoittamiseen ja raidetykkeihin (engl. rail gun) eli sähköenergian kineettiseksi energiaksi muuttaviksi aseiksi. Nämä laitteet voidaan kehittää 20 kV estojännitteeseen asti, jolloin ne toimivat korkeammassa liitoslämpötiloissa. (Agarwal et al. 2008) Piikarbid-GTO:eja ei ole saatavilla kaupallisesti valmistettuina, mutta Genesis Semiconductor on kehittänyt niitä (Genesis Semiconductor 2010 b).

Piikarbid-IGBT:a ei ole vielä saatavilla kaupallisesti, mutta Sung et al. (2009) mukaan piikarbid-IGBT:lla on pienet johtavuushäviöt, kohtuullinen kytkentäaika ja ne toimivat hyvin korkeissa lämpötiloissa, joten piikarbid-IGBT:t ovat tulevaisuudessa tärkeässä asemassa erityisesti yli 10 kV jännitteillä. He ovat vertailleet julkaisussaan 15 kV n-kanavatyyppin

epäsymmetristen ja symmetristen piikarbidi-IGBT:ien sekä MOSFET:ien kytkentätaajuuskäyttötymistä. Kuvassa 3.9 on esitetty 15 kV n-kanavatyyppisten epäsymmetrisen ja symmetrisen piikarbidi-IGBT:n rakennekuvat, jotka Sung et al. ovat suunnitelleet.



Kuva 3.9 15 kV n-kanavatyyppisten epäsymmetrisen ja symmetrisen piikarbidi-IGBT:n rakennekuvat. (Muokattu lähteestä Sung et al. 2009)

Kuvasta 3.9 nähdään, että epäsymmetrisellä IGBT:lla on pienempi n-ajautumisalue kuin symmetrisellä IGBT:lla ja symmetrisellä tyyppillä on puskurialue. Sung et al. simulaatiotutkimuksissa kävi ilmi, että sekä symmetrisellä että epäsymmetrisellä IGBT:lla on samanlaiset kytkentätaajuusominaisuudet. Lisäksi IGBT:lla on MOSFET:a pienemmät tehohäviöt 7 kHz kytkentätaajuudelle saakka. (Sung et al. 2009)

3.2 Galliumnitridikomponentit

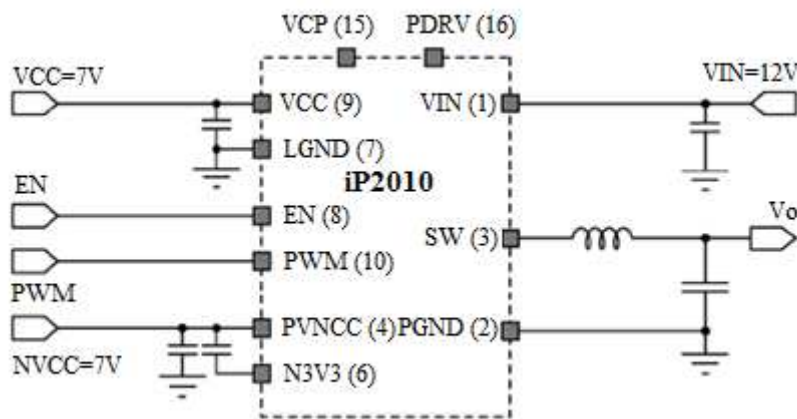
Galliumnitridistä valmistettujen puolijohdtehoikomponenttien kehitys kaupallisesti saataviksi ei ole ollut yhtä voimakasta kuin piikarbidilla, mutta siitäkin valmistetaan FET:ejä (*Field Effect Transistor*), schottky-diodeita ja HEMT:ejä (*High electron mobility transistor*). Taulukossa 3 on esitetty eri valmistajien galliumnitridikomponentteja virta- ja jännitearvoineen. Taulukon 3 komponenteista on kerrottu tarkempia tietoja seuraavissa alakappaleissa ja liitteessä 2.

Taulukko 3. Eri valmistajien galliumnitridikomponentteja virta- ja jännitearvoineen.

| valmistaja komponentti | virta [A] | jännite [V] |
|--|---|--|
| MicroGaN | | |
| schottky-barrier-diodei MGG1D0605D | $I_{\text{fwd}} = 5 \text{ A @ } V_{\text{GS}} = 1.6 \text{ V}$ | $U_{\text{fwd}} = 0,85 \text{ V}$ |
| HEMT MGG1T0617D | | $U_{\text{DS,max}} = 600 \text{ V}$ |
| HEMT MGG1T0610D | | $U_{\text{DS,max}} = 600 \text{ V}$ |
| MGG1T0817D | | $U_{\text{DS,max}} = 800 \text{ V}$ |
| International Rectifier | | |
| FET iP2010 | $I_{\text{OUT}} = 30 \text{ A}$ | $U_{\text{IN}} = 7 - 13,2 \text{ V}$ $U_{\text{OUT}} = 0,6 - 5,5 \text{ V}$ |
| FET iP2011 | $I_{\text{OUT}} = 20 \text{ A}$ | $U_{\text{IN}} = 7 - 13,2 \text{ V}$ $U_{\text{OUT}} = 0,6 - 5,5 \text{ V}$ |
| Fujitsu | | |
| HEMT | ei saatavilla datalehteä | |
| TriQuint Semiconductor | | |
| HEMT TGF2023-20 | $I_{\text{D(max)}} = 20 \text{ A}$ | $U_{\text{D(max)}} = 40 \text{ V}$ |
| Mitsubishi Electric | | |
| MGFC50G3742S HEMT | $I_{\text{DQ}} = 2 \text{ A}$ | $U_{\text{DS}} = 40 \text{ V}$ |
| MGFC46G3742S HEMT | $I_{\text{DQ}} = 1 \text{ A}$ | $U_{\text{DS}} = 40 \text{ V}$ |
| MGFC43G3742S HEMT | $I_{\text{DQ}} = 0,5 \text{ A}$ | $U_{\text{DS}} = 40 \text{ V}$ |
| Toshiba | | |
| TGI8596-50 HEMT | $I_{\text{DS(max)}} = 15 \text{ A}$ | $U_{\text{DS(max)}} = 50 \text{ V}$ |
| Ixys | | |
| FSB10-06SC schottky- dioditasasuuntaaja | $I_{\text{D(AV)}} = 6,6 \text{ A}$ | $U_{\text{RRM}} = 600 \text{ V}$ |
| EPC | | |
| EPC1009 avaustyypin tehotransistori | $I_{\text{D(max)}} = 6 \text{ A}$ | $U_{\text{DS(max)}} = 60 \text{ V}$ |
| EPC1007 avaustyypin tehotransistori | $I_{\text{D(max)}} = 6 \text{ A}$ | $U_{\text{DS(max)}} = 100 \text{ V}$ |
| EPC1010 avaustyypin tehotransistori | $I_{\text{D(max)}} = 12 \text{ A}$ | $U_{\text{DS(max)}} = 200 \text{ V}$ |

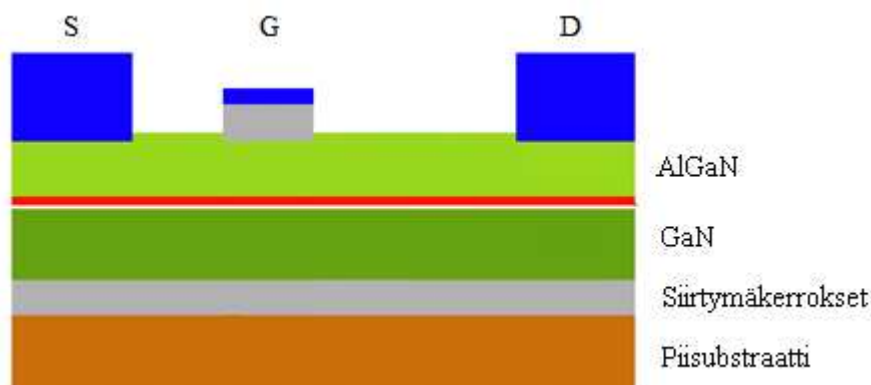
3.2.1 Galliumnitridi-FET

International Rectifier julkaisi vuoden 2010 alussa galliumnitridistä valmistetun FET:n, jonka nimi on iP2010. Varsinainen datalehti on saatavilla ainoastaan International Rectifierin valitsemille asiakkaille. Alustavassa datalehdessä annetaan tulojännitteeksi 7 V - 13,2 V sekä lähtöjännitteeksi 0,6 V - 5,5 V ja -virraksi 30 A. iP2010 toimii 30 MHz taajuudella. (International Rectifier 2010 a) Myös iP2011 on esitelty ja sillä on lähes samat arvot kuin edeltäjällään. Kuvassa 3.10 on esitetty alustavassa datalehdessä kuvattu iP2010-komponentin tyypillinen käyttösovellus.



Kuva 3.10 iP2010 tyypillinen käyttösovellus, jossa keskellä on iP2010-komponentti. (Muokattu lähteestä International Rectifier 2010 a)

International Rectifierin galliumnitriditeknologia perustuu HEMT:iin (*High Electron Mobility Transistor*), jonka rakenne on esitetty kuvassa 3.11.



Kuva 3.11 International Rectifierin galliumnitriditeknologia perustuu HEMT:n rakenteeseen, jossa galliumnitridikerros on piialustan päällä. S (source) kuvaa lähdettä, G (gate) hilaa ja D (drain) nielua. (Muokattu lähteestä International Rectifier 2010 b)

Kuvasta 3.11 nähdään, että galliumnitridikerroksen alla on piialusta. International Rectifierin mukaan pii on halpaa ($< \$ 0.50/\text{cm}^2$) ja siihen perustuva kaksikerroksinen rakenne tekee komponenttien valmistamisen galliumnitridistä ja piistä halvemmaksi kuin piikarbidista ($> \sim \$ 20/\text{cm}^2$) valmistaminen. Yhtiöltä on tulossa 20 V - 200 V tuotteita ja vuonna 2011 on luvassa 600 V tuote. (International Rectifier 2010 b)

3.2.2 Galliumnitridi-schottky-barrier-diodi

MicroGaN on kehittänyt galliumnitridi-schottky-barrier-diodia, joka perustuu yhtiön omaan 3D-GaN-teknologiaan. Yhtiön kotisivuilla on saatavilla MGG1D0605D-schottky-barrier-diodin alustava datalehti, jossa kerrotaan että päästösuuntainen virta $I_{\text{fwd}} = 5 \text{ A}$ ja päästösuuntainen jännite $U_{\text{fwd}} = 0,85 \text{ V}$ (MicroGaN 2010 a). 800 V:n MGG1D0805D-schottky-barrier-diodin datalehti ja näytekomponentit ovat saatavilla vuoden 2010 viimeisellä neljänneksellä (MicroGaN 2010 b).

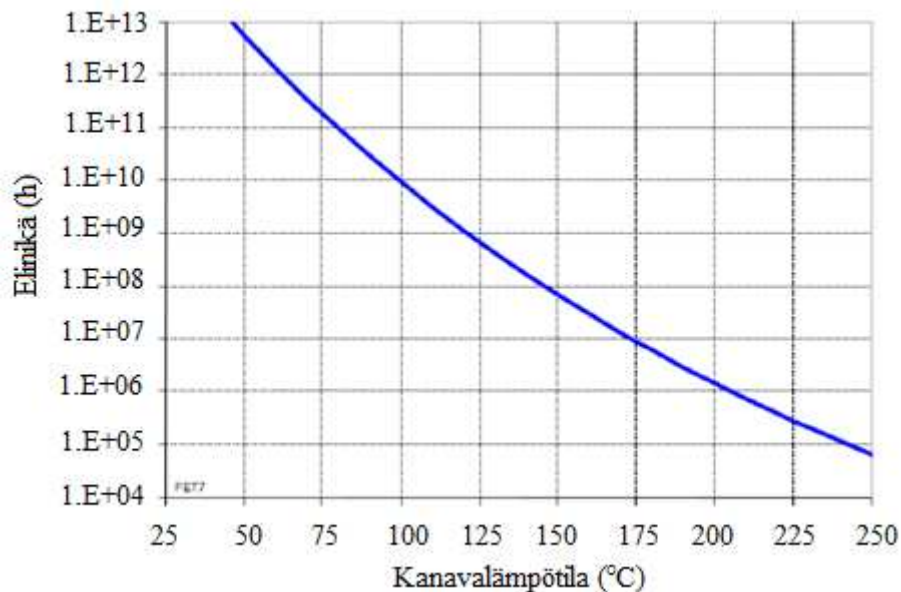
3.2.3 Galliumnitridi-HEMT

MicroGaN on kehittänyt galliumnitridi-HEMT:a, joka perustuu yhtiön omaan 3D-GaN-teknologiaan ja HFET:iin (*Heterostructure Field Effect Transistor*), jossa on piialusta. Ensimmäisessä alustavassa datalehdessä annetaan MGG1T0617D-transistorille $U_{\text{DS,max}} = 600\text{V}$ ja $R_{\text{ON}} = 170 \text{ m}\Omega$ (MicroGaN 2010 c). Muita datalehtiä ei vielä ole saatavilla. Vuoden 2010 kolmannella neljänneksellä MicroGaN julkaisee MGG1T0610D-transistorin (600 V, 170 m Ω) näytekomponentit ja MGG1T0817D-transistorin (800 V, 170 m Ω) näytekomponentit ovat tilattavissa viimeisellä neljänneksellä (MicroGaN 2010 d).

Fujitsun lehdistötiedotteessa 27.5.2010 kerrottiin yhtiön kehittävän galliumnitridi-HEMT:n, joka tuottaa 12,9 W tehon laajalla taajuuskaistalla: 6 - 18 GHz. Fujitsun mukaan HEMT hyötysuhde on korkea ja niitä voidaan käyttää esimerkiksi tutkissa. Komponentin datalehteä ei vielä ole saatavilla. (Fujitsu 2010)

TriQuint Semiconductor on julkaissut vuonna 2008 100 W galliumnitriditeho-HEMT:n. Tuotteen datalehdessä kerrotaan, että komponentin valmistuksessa on käytetty piikarbidia,

jonka päällä galliumnitridikerros on. (TriQuint Semiconductor 2009) Kuvassa 3.12 on esitetty TFG2023-20-HEMT:n elinikä kanavalämpötilan funktiona.



Kuva 3.12 TFG2023-20-HEMT:n elinikä kanavalämpötilan funktiona. (Muokattu lähteestä TriQuint Semiconductor 2009)

Datalehden mukaan kanavalämpötila vaikuttaa suoraan komponentin elinikään. Pitkän käyttöiän takaamiseksi komponentin datalehdellä suositellaan pitämään kanavalämpötila mahdollisimman matalana. (TriQuint Semiconductor 2009)

Mitsubishi Electric Corporation ilmoitti 25.2.2010, että on kehittänyt neljää galliumnitridi-HEMT:a, joiden taajuuskaista on 4 GHz ja ulos saatava teho 2 - 100 W. Komponentit on suunniteltu erityisesti satelliittikäyttökohteisiin, joihin yhtiö uskoo tarvittavan uusia, parempia radiolähettimeitä. Hyötysuhde on 60 % kaikissa tuotteissa. (Mitsubishi Electric 2010) Toshiba Microwave Semiconductor:lla on galliumnitridi-HEMT (TGI8596-50), jonka se on julkaissut vuonna 2009. (Toshiba 2009)

3.2.4 Galliumnitridi-MOSFET

Efficient Power Conversion (EPC) esitteli maaliskuussa 2010 avaustyyppin galliumnitridi-MOSFET:eja, joiden nielu-lähde-jännitteen vaihteluväli on 40 V - 200 V. MOSFET:t ovat valmiita kaupalliseen käyttöön. Uudet komponentit on valmistettu piialustalle, jonka päällä on

galliumnitridiä, mistä johtuen valmistushinta ei ole noussut korkeaksi. Tuotteiden hinnat vaihtelevat \$0,80 ja \$5,00 / 1000 kpl välillä. EPC:n mukaan näitä galliumnitridi-MOSFET:ejä voidaan käyttää mm. DC-DC -teholähteissä, matkapuhelimissa ja tietokoneissa. (EPC 2010)

4 TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Ensimmäiset piikarbidi-schottky-diodit julkaistiin vuonna 2001. Tämän jälkeen vajaassa kymmenessä vuodessa markkinoille on tullut monia tässäkin työssä esitettyjä komponentteja ja niiden paranneltuja versioita kiivaalla tahdilla. Lähitulevaisuudessa julkaistaan jälleen uusia komponentteja ja niiden myötä myös jatkotuotekehitys ja uusien komponenttien suunnittelu saavat vauhtia. Esimerkiksi piikarbidi-IGBT on mielenkiintoinen komponentti ja sen kehittymistä kaupalliseen tuotantoon odotetaan.

Tehoelektroniikan puolijohteiden kehittäminen piikarbidista ja galliumnitridistä näyttää lupaavalta tulevaisuudessa, sillä yrityksiä on vastikään perustettu erikoistumaan juuri näihin materiaaleihin. Esimerkiksi saksalainen MicroGaN on galliumnitriditeknologian yritys. Se on perustettu 2000-luvun alussa ja keskittyy nykyään korkeatehoisiin ja -jännitteisiin sovelluksiin. Ruotsalainen TranSiC puolestaan kehittää ja valmistaa piikarbidista tehotransistoreja. Lisäksi monet jo olemassa olleet yritykset, kuten Infineon Technologies, ovat alkaneet panostaa perinteisten materiaalien ohella myös piikarbidi- ja galliumnitriditeknologiaan.

Erityisesti piikarbidikomponenttien valmistaminen on kallista ja niiden hinta on tällä hetkellä suuri, mikä on este piikarbidin etenemiselle laajaan käyttöön. Tulevaisuudessa haasteena ovatkin komponenttien hinnan pienentäminen ja myös hyötysuhteen parantaminen, jonka avulla saataisi säästöjä järjestelmätasolla ja piikarbidikomponenttien käyttäminen tulisi siten taloudellisesti järkeväksi. Yhtenä ratkaisuna voi nähdä esimerkiksi International Rectifierin kehittämät galliumnitridi-JFET:t, joissa käytetään piitä galliumnitridikerroksen alla, mikä tuo säästöjä valmistuskustannuksiin.

Komponenttien käyttökohteita tulevaisuudessa

Sekä piikarbidi- että galliumnitridipuolijohdetehotuotteista hyötävät tulevaisuuden energiansäästöpainneissa monet teollisuuden alat, joita ovat esimerkiksi hybridi- ja sähköautoteollisuus sekä öljy- ja kaasuteollisuus. Tämä johtuu piikarbidi- ja galliumnitridikomponenttien hyvästä hyötysuhteesta ja muista huomattavista eduista verrattuna esimerkiksi piikomponentteihin. Näin ollen kysyntää tarpeisiin vastaaville komponenteille tulee olemaan.

Kappaleessa 3.1.3 esitellyssä aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen maailmanennätyksen saavuttamisessa käytettiin piikarbidi-JFET:eja. Tämän perusteella voidaan arvella, että piikarbidiä tullaan käyttämään aurinkosähkövaihtosuuntaajissa.

Jotkin laitevalmistajat ovat ottaneet piikarbidi- ja galliumnitridikomponentteja käyttöön. Näistä Mitsubishi on kehittänyt kahta ilmalämpöpumppua, jotka sisältävät vaihtosuuntaajan, joka puolestaan sisältää piikarbidi-schottky-diodeita. Ilmalämpöpumpun julkaisu on lokakuussa 2010. Mitsubishin mukaan näiden uusien vaihtosuuntaajien kytkentähäviöt ovat noin 60 % pienemmät kuin pelkistä piikomponenteista valmistettujen vaihtosuuntaajien hyötysuhde, mikä on piikarbidi-schottky-diodien ansiota. Seuraavana tavoitteena yhtiöllä on kehittää versio, jossa nyt käytettävän pii-IGBT:n tilalle asetetaan piikarbidi-MOSFET. Aikomuksena on siten parantaa hyötysuhdetta entisestään. (I-Micronews 2010)

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli kartoittaa piikarbidi- ja galliumnitridipuolijohdetehokomponenttien tämän hetkistä tilannetta markkinoilla. Työ tehtiin käymällä läpi valmistajien datalehtiä ja kokoamalla niiden perusteella liitteeksi taulukkomuotoinen yhteenveto saatavilla olevien ja lähitulevaisuudessa julkaistavien komponenttien arvoista. Lisäksi on esitetty myös tutkimustuloksia, joista käy ilmi komponenttien vaikutuksia koko sähkökäyttöön. Työssä selvisi, että komponenttivalmistajien pääajatuksena on laitteiden hyötysuhteiden parantaminen ja sitä kautta energian säästäminen.

Työssä on esitetty monien valmistajien eri komponentteja pyrkien mahdollisimman monipuoliseen esitykseen niin valmistajissa kuin komponenteissakin. Vaikka useita valmistajia ja komponentteja on käyty läpi, puutteita varmasti on, mikä johtuu valmistajien suuresta lukumäärästä. Mielestäni työ onnistui kuitenkin hyvin, koska tietoa oli saatavilla, vaikka sitä piti etsiä välillä pitkäänkin komponenttivalmistajien Internet-sivuilta ja joissakin tapauksissa myös sähköpostin välityksellä. Joitakin mielenkiintoisia tietoja ei kuitenkaan löytynyt. Esimerkiksi monien komponenttien hintatietojen saatavuudessa oli ongelmia, mikä johtui luultavasti siitä, että kyseisiä komponentteja ei vielä ollut markkinoilla tai ne olivat vasta julkaistuja. Tarkoituksena oli kirjoittaa myös komponenttien huonoista puolista, mutta valmistajat eivät näitä tietoja luonnollisestikaan mainosta eikä tietoa löytynyt muualtakaan. Siksi huonojen puolien käsittely jätettiin pois työstä.

Tehoelektroniikan puolijohdekomponenttien tuotekehityksen alalla on jatkuvaa kehitystä ja, kuten työssä todetaan, uusia tuotteita on luvassa monilta valmistajilta jo lähitulevaisuudessa. Näin ollen työn esittämään komponenttilistaan tulee lisäyksiä nopealla tahdilla. Jatkossa voisi tehdä uuden tutkimuksen, jossa täydennettäisiin komponenttilistaa ja otettaisiin selvää onko alalle mahdollisesti tullut uusia valmistajia. Komponenttien hintojen kehittyminen, uudet sovelluskohteet ja huonot puolet olisi mielenkiintoista tietää.

LÄHTEET

- (Agarwal et al. 2008) Anant Agarwal, Quinchun (Jon) Zhang, Al Burk, Robert Callanan, Supid Mazumder. 2008. *Prospects of bipolar power devices in silicon carbide*. Cree Inc. IEEE-tietokanta. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. Issue date 10.-13.11.2008.
- (Bandieramonte 2009) Powerex, press release. 10/2009. Kelly Bandieramonte. *Powerex Introduces 2 new 1200V, 100A Dual Silicon Carbide MOSFET Modules Designed for High Efficiency*. [viitattu 18.8.2010] Saatavana: <http://www.pwr.com/TechnicalDocument.aspx?id=966>
- (Cree 2009) Cree, press releases. 17.2.2009. *Cree and Powerex Develop New SiC Power Switches for Next-Generation Military Systems*. [viitattu 18.8.2010] Saatavana: http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1234879464387
- (Cree 2010) Cree, press releases. 28.4.2010. *Cree Revolutionizes High-Efficiency Switching with New Z-Rec™ 1700-V Junction Barrier Schottky Diode Series*. [viitattu 12.8.2010] Saatavana: http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1272459318840
- (EPC 2010) EPC Corporation, news. 5.3.2010. *Efficient Power Conversion Corporation Announces 40 V to 200V Enhancement Mode GaN Power Transistors*. [viitattu 8.9.2010] Saatavana: <http://epc-co.com/epc/EventsandNews/tabid/63/EntryId/5/Efficient-Power-Conversion-Corporation-Announces-40-V-to-200V-Enhancement-Mode-GaN-Power-Transistors.aspx>
- (Fujitsu 2010) Fujitsu, press releases. 27.5.2010. *Fujitsu Develops Gallium-Nitride HEMT Amplifier Featuring World's Highest Output in the C-Ku Band*. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:

<http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2010/20100527-01.html>

- (Fraunhofer ISE 2009) Fraunhofer ISE, press release 15/09. 29.7.2009.
Fraunhofer ISE sets a new world record - PV inverter efficiency exceeds 99 percent. [viitattu 29.7.2010]
Saatavana: <http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/press-releases/press-releases-2009/fraunhofer-ise-sets-a-new-world-record-pv-inverter-efficiency-exceeds-99-percent>
- (Fraunhofer ISE 2010) Fraunhofer ISE, homepage Welcome. [viitattu 29.7.2010]
Saatavana: http://www.ise.fraunhofer.de/welcome-to-the-web-pages-of-the-fraunhofer-institute-for-solar-energy-systems?set_language=en&cl=en
- (Genesic Semiconductor 2010 a) Genesic Semiconductor, datalehti GA02SHT12-220. 7/2010. [viitattu 2.9.2010] Saatavana: <http://www.genesicsemi.com/index.php/products/sic-rectifiers/sic-jbs-rectifier>
- (Genesic Semiconductor 2010 b) Genesic Semiconductor. Tuoteluettelo internet-sivuilla. 2010. [viitattu 2.9.2010] Saatavana: <http://www.genesicsemi.com/index.php/products/sicthyristors>
- (Hefner 2001) A. E. Hefner Jr., R. Singh, J-H. Lai, D. W. Berning, S. Bouché, C. Chapuy, *SiC Power Diodes Provide Breakthrough Performance for a Wide Range of Applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 2, March 2001.
- (I-Micronews 2010) I-Micronews, power electronics, 25.8.2010. *Mitsubishi's air conditioners come with inverter module Using SiC-based SBD.* [viitattu 8.9.2010] Saatavana: <http://www.i-micronews.com/news/Mitsubishis-air-conditioners-come-inverter-module-Using-SiC,5318.html>

- (Infineon technologies 2008) Infineon technologies, datalehti: SDP04S60. [viitattu 27.7.2010]
- (Infineon technologies 2010) Infineon technologies, datalehti: IDD12SG60C. [viitattu 27.7.2010] Saatavana: http://www.infineon.com/dgdl/IDD12SG60C_rev2.2.pdf?folderId=db3a30431d8a6b3c011dbeca72db281a&fileId=db3a30431ff98815012047f316f72cfc
- (International Rectifier 2010 a) International Rectifier, datalehti: iP2010. [viitattu 6.9.2010] Saatavana: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ip2010pbf.pdf>
- (International rectifier 2010 b) International rectifier, *GaNpowIR – an introduction*. 2/2010. [viitattu 21.8.2010] Saatavana: <http://www.irf.com/product-info/ganpowir/GaNGeneral.pdf>
- (Lindgren 2010) Anders Lindgren. Sähköpostikeskustelu 29.7.2010. [viitattu 29.7.2010]
- (Linköpingin yliopisto 2010) Linköpingin yliopisto: The Department of Physics, Chemistry and Biology: Semiconductor materials – materiaalin kappaleet 2-3. [viitattu 21.8.2010] Saatavana: https://www.ifm.liu.se/semicond/new_page/research/sic/Chapter2.html
- (Ixys 2008) Ixys, datalehti: Silicon Carbide Schottky Rectifier Bridge FSB10-06SC, 2008. [viitattu 8.9.2010] Saatavana: <http://ixdev.ixys.com/DataSheet/FBS10-06SC.pdf>
- (Mark et al. 2009) Mark A.L. Johnson, Doug W. Barlage. 9.-11.12.2009. *Advances in Gallium Nitride Materials and Structures for Power Electronics*. IEEE-tietokanta. Semiconductor Device Research Symposium, 2009. ISDRS '09. International. Issue date 9.-11.12.2009.

- (MicroGaN 2010 a) MicroGaN, products. *HV Diode MGG1D0605D* [viitattu 18.8.2010] Saatavana:
<http://www.microgan.com/includes/products/MGG1D0605D.pdf>
- (MicroGaN 2010 b) MicroGaN, products. High Voltage Switches. Normally-on HEMT Switch 600V-170mOhm. [viitattu 18.8.2010] Saatavana:
<http://www.microgan.com/index.php?site=products§ion=switch&pid=1>
- (MicroGaN 2010 c) MicroGaN, products. *HV Diode MGG1T0617D*. [viitattu 18.8.2010] Saatavana:
<http://www.microgan.com/includes/products/MGG1T0617D.pdf>
- (MicroGaN 2010 d) MicroGaN products. High Voltage Switches: Normally-on HEMT Switch 800V-170mOhm. [viitattu 18.8.2010] Saatavana:
<http://www.microgan.com/index.php?site=products§ion=switch&pid=2>
- (Mitsubishi Electric 2010) Mitsubishi Electric, press releases 2010. 25.2.2010. *Mitsubishi Electric Develops World's First GaN HEMT Amplifier Exclusive to Satellite Applications*. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
http://global.mitsubishielectric.com/news/news_releases/2010/mel0780.pdf
- (Palmour 2006) John W. Palmour. *Energy Efficient Wide Bandgap Devices*. [viitattu 18.8.2010] Saatavana:
http://www.cree.com/cn/products/pdf/Energy_Efficient_Wide_Bandgap_Devices.pdf
- (Pan et al. 2009) Sanbo Pan, Chris Mi ja Tim Lin. 2009. *Design and testing of silicon carbide JFETs based inverter*. IEEE-tietokanta. Power Electronics and Motion Control Conference, 2009.

IPEMC '09. IEEE 6th International. Issue date 17.-20.5.2009.

- (Powerex 2010 a,b) Powerex Inc. Alustava datalehti. Silicon Carbide MOSFET Module QJD1210006. 4/2010. [viitattu 24.9.2010]
 Saatavana:
<http://www.pwrx.com/pwrx/docs/qjd1210006.pdf>
- Alustava datalehti. Silicon Carbide MOSFET Module QJD1210007. 4/2010. [viitattu 24.9.2010] Saatavana:
<http://www.pwrx.com/pwrx/docs/qjd1210007.pdf>
- (Roos 2010) Gina Roos. Electronics Advocate. April 28, 2010. *SiC Schottky diode demand takes off in 2009*. [viitattu 28.7.2010] Saatavana:
<http://www.electronicadvocate.com/2010/04/28/sic-schottky-diode-demand-takes-off-in-2009/>
- (Semisouth 2010) Semisouth laboratories. *SemiSouth Announces Two New 1700 V and 1200 V SiC JFET Products*. 30.4.2010. [viitattu 15.9.2010] Saatavana:
http://www.semisouth.com/news/press_releases/2010-04-30_New_1700V_and_1200V_SiC_JFETs.html
- (Sintonen 2009) Sintonen. Diplomityö, teknillinen korkeakoulu. 9.4.2009. *Superhilarakenteiden karakterisointi röntgendiffraktio- ja röntgenheijastusmenetelmillä*. [viitattu 29.7.2010]
 Saatavana: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100051.pdf>
- (Stevanovic & al. 2010) Ljubisa D. Stevanovic, Kevin S. Matocha, Peter A. Losee, John S. Glaser, Jeffrey J. Nasadoski ja Stephen F. Arthur. 2010. *Recent advances in silicon carbide MOSFET power devices*. General Electric Global Research Center Niskayna. IEEE-tietokanta. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. Issue date 21.-25.2.2010.
- (Sung et al. 2009) Woongje Sung, Jun Wang, Alex Q. Huang, B. Jayant Baliga. *Design and investigation of frequency capability of*

15 kV 4H-SiC IGBT. IEEE-tietokanta. Power Semiconductor Devices & IC's, 2009. ISPSD 2009. 21st International Symposium on. Issue date 14.-18.6.2009.

- (Tek 2006) Tekniikan akateemisten liitto, uutisarkisto 2001-2005. Viimeksi muokattu 16.6.2006. *Millennium-tekniologiapalkinnon voittaja professori Shuji Nakamura ja hänen menestyksensä työnsä*. [viitattu 29.7.2010] Saatavana: <http://www.tek.fi/index.php?id=458>
- (Toshiba 2009) Toshiba Microwave Semiconductor, datalehti: Microwave power GaN HEMT TGI8596-50. 5/2009. [viitattu 8.9.2010] Saatavana: <http://www.toshiba.com/taec/components/Datasheet/TGI8596-50ver4.pdf>
- (Transic 2010) Transic, SiC in BJT's. [viitattu 29.7.2010] Saatavana: <http://www.transic.com/index.php/sic-in-bjts>
- (TriQuint Semiconductor 2009) TriQuint Semiconductor, galliumnitridituotteet. [viitattu 15.9.2010] Saatavana: http://www.triquint.com/prodserv/search/actProductSearch.cfm?SLS=95&SLF=status&PN=&D=GaN&A=7&PT=8&FL=&FH=&DRL=&DRH=&FM=GHz&DRM=Gb%2Fs&SF7=part_num&ST7=asc&SF12=part_num&ST12=asc&SF95=description&ST95=asc#95
- (United Silicon Carbide 2010 a) Alustava datalehti: Normally On Silicon Carbide Power JFET. 2/2010 [viitattu 6.9.2010] Saatavana: http://www.unitedsic.com/JFET_600V.pdf
- (United Silicon Carbide 2010 b,c) Alustava datalehti: 600 V 4HSiC power NPN power transistor. 2/2010 [viitattu 6.9.2010] Saatavana: http://www.unitedsic.com/600V_BJT.pdf
Alustava datalehti: 1200 V 4HSiC power NPN power transistor. 2/2010 [viitattu 6.9.2010] Saatavana: http://www.unitedsic.com/1200V_BJT.pdf

- (Walden & Cooper 2009) G. G. Walden and J. A. Cooper. 2009. *On-State Characteristics of SiC Thyristors for the 8 – 20 kV Regime*. School of Electrical and Computer Engineering and Birck Nanotechnology Center Purdue University. IEEE-tietokanta. Device Research Conference, 2009. DRC 2009. Issue date 22.-24.6.2009.
- (Zarebski et Dabrowski 2008) J. Zarebski, J. Dabrowski 2008. *Non-isothermal Characteristics of SiC Power Schottky Diodes*. IEEE-tietokanta. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on. Issue date 11.-13.6.2008.
- (Zeng 2009) Vincent Zeng. Infineon Technologies. 2009. *Achieving high power density design with Infineon power solution*.
- (Zolper 2005) J. C. Zolper. 2005. *Emerging Silicon Carbide Power Electronics Components*. IEEE-tietokanta. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE. Issue date 6.-10.3.2005.
- (Zuk 2008) Zuk, P. *SiC Impacts 'Greening' of Power: Understanding the differences between Silicon Carbide (SiC) and Silicon (Si) for power electronics*. Power system design, Jul/Aug 2008, S. 34-36

| valmistaja komponentti | I [A] | U [V] | P [W] | Q_c [C] | hinta [€/kpl] | t [ns] | R [Ω] | E [J] |
|--|---|---|--|-----------|------------------|---|---|---------|
| JFET ⁽⁶⁾ | $I_D = 30 \text{ A @}$ $T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ | $U_{DS} =$ 600 V | 150 W | | | $t_r = 69 \text{ ns}$ $t_f = 52 \text{ ns}$ $@ U_{DS} =$ $300 \text{ V}, I_D =$ $10 \text{ A}, T_j =$ $125 \text{ }^\circ\text{C}$ | $R_{DS(ON)max}$ $= 0,045 \text{ } \Omega$ $@ T_j = 25$ $^\circ\text{C}$ | |
| BJT 600V | $I_C = 10 \text{ A}$ | $U_{CBO} =$ 600 V | $T_{j(max)}$ $=$ $175 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | $R_{ON} =$ $189 \text{ m}\Omega @$ $T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
| BJT 1200V | $I_C = 10 \text{ A}$ | $U_{CBO} =$ 600 V | $T_{j(max)}$ $=$ $175 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | $R_{ON} =$ $158 \text{ m}\Omega$ $@ T_j =$ $175 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
| Transic | | | | | | | | |
| BJT BitSiC BT1206AB-P1 ($T_{j(max)} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) | $I_C = 6 \text{ A}$ | $U_{CE0} =$ 1200 V $U_{CE,s} =$ 1 V | | | | | $R_{ON,s} =$ $167 \text{ m}\Omega$ $@ T_{jmax}$ | |
| BJT BitSiC BT1206AC-P1 ($T_{j(max)} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$) | $I_C = 6 \text{ A}$ | $U_{CE0} =$ 1200 V $U_{CE,s} =$ $0,75 \text{ V}$ | | | | | $R_{ON,s} =$ $125 \text{ m}\Omega$ $@ T_{jmax}$ | |
| BJT BitSiC BT1220AB-P1 ($T_{j(max)} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) | $I_C = 20 \text{ A}$ | $U_{CE0} =$ 1200 V $U_{CE,s} =$ 1 V | | | | | $R_{ON,s} =$ $50 \text{ m}\Omega$ $@ T_{jmax}$ | |
| BJT BitSiC BT1220AC-P1 ($T_{j(max)} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$) | $I_C = 20 \text{ A}$ | $U_{CE0} =$ 1200 V $U_{CE,s} =$ $0,75 \text{ V}$ | | | | | $R_{ON,s} =$ $38 \text{ m}\Omega$ $@ T_{jmax}$ | |
| GeneSiC Semiconductor | | | | | | | | |
| barrier-schottky- tasasuuntain | $I_F = 2 \text{ A}$ | $U_{RRM} =$ 1200 V | 49 W $@$ $T_{case} =$ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ | 3,2 nC | | $t_{sw} < 30 \text{ ns}$ | | |
| Powerex | | | | | | | | |
| MOSFET QJD1210006- moduuli | $I_D = 100 \text{ A @}$ $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ | $U_{DS} =$ 1200 V | 880 W $@ T_j <$ $175 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | MOSFET: $R_{DS(ON)max}$ $= 32 \text{ m}\Omega$ $@$ $T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
| MOSFET QJD1210007- moduuli | $I_D = 100 \text{ A @}$ $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ | $U_{DS} =$ 1200 V | 880 W $@ T_j <$ $175 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | MOSFET: $R_{DS(ON)max}$ $= 32 \text{ m}\Omega$ $@$ $T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ | |

- ⁽¹⁾ Cree. Datalehti CPW3-1700S010. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
<http://www.cree.com/products/pdf/CPW3-1700S010.pdf>
- ⁽²⁾ Cree. Datalehti C3D20060D. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
<http://www.cree.com/products/pdf/C3D20060D.pdf>
- ⁽³⁾ Semisouth. Datalehti DS_SJEP170R550. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
http://www.semisouth.com/products/uploads/DS_SJEP170R550_rev1.3.pdf
- ⁽⁴⁾ Semisouth. Datalehti DS_SJDP120R085. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
http://www.semisouth.com/products/uploads/DS_SJDP120R085_rev1.0.pdf
- ⁽⁵⁾ Semisouth. Datalehti SDP30S120. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
<http://www.semisouth.com/products/uploads/SDP30S120.pdf>
- ⁽⁶⁾ United silicon carbide. Datalehti JFET600V. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:
http://www.unitedsic.com/JFET_600V.pdf

LIITE 2: Valmistettavien galliumnitridikomponenttien taulukko

Taulukon kolumnien symbolit: I virta, U jännite, P tehoviivo, f kytkentätaajuus, R_{DS} nielu-
lähde-resistanssi ja P_{out} ulostuloteho.

| valmistaja komponentti | I [A] | U [V] | P [W] | f [Hz] | R [Ω] | P_{out} [W] |
|--|---|--|--|--|-------------------------------------|-----------------|
| MicroGaN | | | | | | |
| schottky- barrier-diodi MGG1D060 5D | $I_{fwd} = 5 \text{ A @}$ $V_{GS} = 1.6 \text{ V}$ | $U_{fwd} =$ $0,85 \text{ V}$ | | | | |
| HEMT MGG1T061 7D ⁽¹⁾ | | $U_{DS,max} =$ 600 V | | | | |
| HEMT MGG1T061 0D | | $U_{DS,max} =$ 600 V | | | $R_{ON} =$ $170 \text{ m}\Omega$ | |
| MGG1T081 7D | | $U_{DS,max} =$ 800 V | | | | |
| Internation al Rectifier | | | | | | |
| FET iP2010 | $I_{OUT} = 30 \text{ A}$ | $U_{IN} =$ $7 - 13,2 \text{ V}$ $U_{OUT} =$ $0,6 - 5,5 \text{ V}$ | | $250 \text{ kHz} -$ 3 MHz | | |
| FET iP2011 | $I_{OUT} = 20 \text{ A}$ | $U_{IN} =$ $7 - 13,2 \text{ V}$ $U_{OUT} =$ $0,6 - 5,5 \text{ V}$ | | $250 \text{ kHz} -$ 5 MHz | | |
| Fujitsu | | | | | | |
| HEMT | ei saatavilla datalehteä | | | | | |
| TriQuint Semiconduc tor | | | | | | |
| HEMT TGF2023-20 | $I_{D(max)} = 20 \text{ A}$ | $U_{D(max)} =$ 40 V | $P_{D(max)} =$ 128 W $@$ $T_{baseplate}$ $= 75 \text{ }^\circ\text{C}$ | $\text{DC} - 18 \text{ GHz}$ | | |
| Mitsubishi Electric | | | | | | |
| MGFC50G3 742S HEMT | $I_{DQ} = 2 \text{ A}$ | $U_{DS} = 40 \text{ V}$ | | $3,7 - 4,2 \text{ GHz}$ | | 100 W |
| MGFC46G3 742S HEMT | $I_{DQ} = 1 \text{ A}$ | $U_{DS} = 40 \text{ V}$ | | $3,7 - 4,2 \text{ GHz}$ | | 40 W |
| MGFC43G3 742S HEMT | $I_{DQ} = 0,5 \text{ A}$ | $U_{DS} = 40 \text{ V}$ | | $3,7 - 4,2 \text{ GHz}$ | | 20 W |

| valmistaja komponentti | I [A] | U [V] | P [W] | f [Hz] | R [Ω] | P_{out} [W] |
|--|------------------------------|-------------------------------|--|----------|--------------------------------------|---------------|
| Toshiba | | | | | | |
| TGI8596-50 HEMT | $I_{DS(max)} = 15 \text{ A}$ | $U_{DS(max)} = 50 \text{ V}$ | $P_T = 140 \text{ W}$ @ $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | |
| Ixys | | | | | | |
| FSB10-06SC schottky- dioditasa- suuntaaja | $I_{D(AV)} = 6,6 \text{ A}$ | $U_{RRM} = 600 \text{ V}$ | | | | |
| EPC | | | | | | |
| EPC1009 avaustyyppin tehotransisto- ri ⁽²⁾ | $I_{D(max)} = 6 \text{ A}$ | $U_{DS(max)} = 60 \text{ V}$ | | | $R_{DS(ON)max} = 30 \text{ m}\Omega$ | |
| EPC1007 avaustyyppin tehotransisto- ri ⁽³⁾ | $I_{D(max)} = 6 \text{ A}$ | $U_{DS(max)} = 100 \text{ V}$ | | | $R_{DS(ON)max} = 30 \text{ m}\Omega$ | |
| EPC1010 avaustyyppin tehotransisto- ri ⁽⁴⁾ | $I_{D(max)} = 12 \text{ A}$ | $U_{DS(max)} = 200 \text{ V}$ | | | $R_{DS(ON)max} = 25 \text{ m}\Omega$ | |

⁽¹⁾ Microgan. Datalehti MGG1T617D. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:

<http://www.microgan.com/includes/products/MGG1T0617D.pdf>

⁽²⁾ EPC. Datalehti EPC1009. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:

http://epc-co.com/epc/documents/datasheets/EPC1009_datasheet_final.pdf

⁽³⁾ EPC. Datalehti EPC1007. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:

http://epc-co.com/epc/documents/datasheets/EPC1007_datasheet_final.pdf

⁽⁴⁾ EPC. Datalehti EPC1010. [viitattu 8.9.2010] Saatavana:

http://epc-co.com/epc/documents/datasheets/EPC1010_datasheet_final.pdf