



IGBT-TRANSISTORI

Janne Salonen

Opinnäytetyö
Joulukuu 2013
Tietoliikennetekniikka
Sulautetutjärjestelmät ja
elektroniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietoliikennetekniikka
Sulautetutjärjestelmät ja elektroniikka

JANNE SALONEN:
IGBT-transistori

Opinnäytetyö 29 sivua
Joulukuu 2013

Työn tavoitteena on tutustua IGBT-transistorin toimintaan. Sain aiheen opinnäytetyöhön opettajan vinkistä, ja sattumalta luin myös Tekniikan Maailma-lehteä, jossa kerrottiin sähkövetureista. Sähkövetureissa käytettiin IGBT-transistoria sähkömoottorin ohjaukseen.

Puolijohteet johtavat paremmin kuin eristeet, mutta huonommin kuin johteet. Puolijohdet valmistetaan lisäämällä niihin vieraita atomeja. Puolijohderakennetta on kahdenlaista: N- ja P-tyyppistä materiaalia.

Bipolaaritransistoreita on kahdenlaista tyyppiä: NPN- ja PNP-transistoreita. Transistori alkaa johtaa, kun transistorin kannalla oleva noin 0,5 V kynnsjännite ylitetään. Kollektorivirran ja kantavirran suhdetta sanotaan vahvistukseksi, jonka lyhenne on h_{FE} .

MOSFET:iä on olemassa sulku- ja avaustyyppistä. MOSFET:in hilalle tuotu ohjausjännite avaa kanavan emitteriltä kollektorille.

IGBT-transistori on sekoitus bipolaaritransistoria ja MOSFET:iä. IGBT-transistori näyttää kollektoripuolelta bipolaaritransistorilta ja ohjauspuolelta MOSFET:iltä. IGBT-transistoria käytetään kytkimenä. IGBT-transistorilla voi olla kaksi eri rakennetta: PT-arkkitehtuuri ja NPT-arkkitehtuuri.

Kahdella erityyppisellä transistorilla tehtiin testikytkentä, jossa mitattiin, missä vaiheessa transistorit alkavat johtaa. Lisäksi mitattiin transistorien kytketyms- ja katkaisuvii-veet sekä mitattiin ja laskettiin hilavaraus. Saturaatiojännite mitattiin sekä kollektorivirran että hilajännitteen funktiona. Osaa mitatuista arvoista verrattiin datalehdessä saatuihin arvoihin.

Asiasanat: IGBT-transistori, transistori, MOSFET, puolijohde.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
ICT Engineering
Embedded system and electronics

JANNE SALONEN:
IGBT-transistor

Bachelor's thesis 29 pages
December 2013

This work introduces IGBT-transistor operating principle. Electric trains use IGBT-transistor control electric motor.

Semiconductors' resistance is better than that of electrical insulating materials-, but less than that of conductors. Semiconductor are made by adding another atom. There are two types of semiconductors, N and P.

They are two types of bipolartransistors-NPN- and PNP-transistor. Transistor starts to conduct when base voltage rises over 0,5 V. Gain h_{FE} is collector current and base current ratio.

They are two type of depletion- and enhancement-type MOSFET. MOSFET gate voltage open channel emitter to collector.

There are two types of IGBT-transistors, bipolartransistor and MOSFET. IGBT-transistor is used as a switch. IGBT-transistor are two type structures PT and NPT.

Two transistor make test circuit and measurements were taken, when transistor start conduct, transistor on delay and off delay. Measure gate charge and calculation. Measure saturation voltage collector current function and saturation voltage gate voltage function. Measure part of compared datasheet data.

Key words: IGBT-transistor, transistor, MOSFET, semiconductor.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	PUOLIJOHTEET	7
3	BIPOLAARITRANSISTORI.....	9
4	MOSFET	10
4.1	Sulkutyypinen MOSFET	10
4.2	Sulkutyypisen MOSFET:in toiminta	11
4.3	Avaustyypinen MOSFET	12
4.4	Avaustyypisen MOSFET:in toiminta	13
5	IGBT-TRANSISTORI	14
5.1	IGBT-transistorin rakenne	14
5.1.1	NPT-transistorin rakenne	15
5.1.2	PT-transistorin rakenne	15
5.2	IGBT-transistorin sijaiskytkentä.....	16
5.3	IGBT-transistorin kytkeytyminen johtavaan tilaan ja estotilaan	16
5.3.1	Kytkeytyminen johtavaan tilaan	16
5.3.2	Kytkeytyminen estotilaan.....	17
5.4	IGBT-transistorin kapasitanssi	18
6	IGBT-TRANSISTORIN TESTIKYTKENTÄ.....	19
6.1	IGBT-transistorin johtamiskäyrämittaus	19
6.2	IGBT-transistorin kytkeytymisviive ja katkaisuviive.....	22
6.3	IGBT-transistorin hilavaraus	24
6.4	Saturaatiojännite	24
7	YHTEENVETO	28
	LÄHTEET.....	29

LYHENTEET JA TERMIT

D	Kollektori
FET	Kanavatransistori
G	Hila
h_{FE}	Vahvistuskerroin
IGBT	Eristehila-bipolaaritransistori
MBE	Molekyylisuihkumenetelmä
MOSFET	Eristehilatransistori
S	Emitteri

1 JOHDANTO

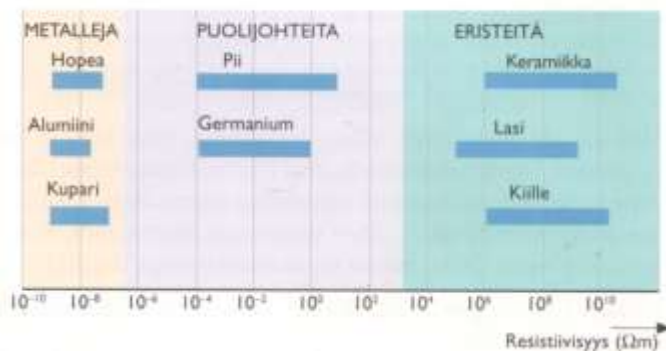
Työn tavoitteena on tutustua IGBT-transistorin toimintaan ja rakenteeseen. Lisäksi transistorin toimintaa todetaan erilaisilla mittauksilla.

Opinnäytetyö jakautuu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään puolijohteiden rakennetta. Toisessa osassa tutustutaan IGBT-transistorin rakenteeseen ja toimintaan. IGBT-transistori sisältää bipolaaritransistorin ja MOSFET:in ominaisuuksia, joten perehdytään molempien komponenttien rakenteeseen ja toimintaan. Komponentista on olemassa kahdenlaisia versioita: NPT-rakenteisia ja PT-rakenteisia. IGBT-transistorin toimintaa selvitetään sijaiskytkennän avulla.

Kolmannessa osassa tehdään IGBT-transistorille koekytkentä, josta mitataan transistorin ominaisuuksia. Hilalle syötetään erisuuruisia jännitteitä ja samalla katsotaan, kuinka kollektorivirta muuttuu. Mitataan transistorin kytkentäviiveitä sekä mitataan ja laskeaan IGBT-transistorin hilavaraus.

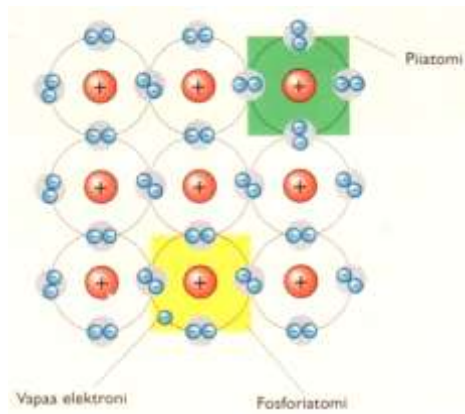
2 PUOLIJOHTEET

Puolijohteet johtavat nimensä mukaisesti virtaa huonommin kuin johteet, mutta paremmin kuin eristeet, kuten kuvasta 1 nähdään. Absoluuttisen nollopisteen lämpötilassa puolijohteet toimivat eristeinä, mutta lämpötilan noustessa niiden johtavuus kasvaa. Puolijohteet saadaan toimimaan halutulla tavalla lisäämällä niihin vieraita atomeita. Tyypillisesti puolijohteilla on neljä valenssielektronia eli neljä elektronia uloimmalla kuorella. Tällainen rakenne mahdollistaa hyvin lujan kiderakenteen. Esimerkiksi hiilellä on neljä valenssielektronia, jolloin sen kiteistä muotoa sanotaan timanttiseksi. Puolijohteelle tyypilliset ominaisuudet saadaan sekoittamalla siihen ainetta, jolla on kolme tai viisi valenssielektronia. Tätä sanotaan seostamiseksi. [1, s. 53–55.]



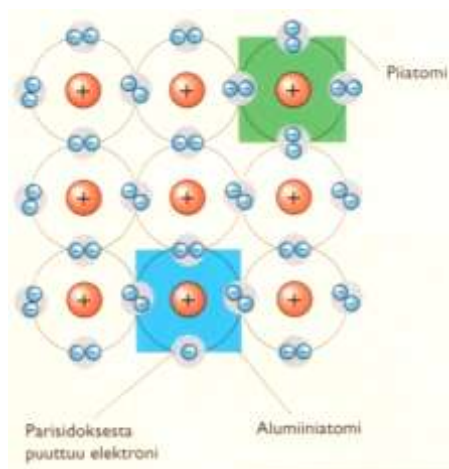
KUVA 1. Puolijohteet sijoittuvat metallien ja eristeiden väliin materiaalien resistiivisyydessä [1, s. 53].

Seostamisessa käytetään tavallisesti alumiinia, jolla on kolme valenssielektronia, ja fosforia, jolla on viisi valenssielektronia. Kun puolijohteeseen lisätään fosforin viidellä valenssielektronilla olevia atomeja, jää yksi elektroni vapaaksi, eikä fosfori riko kiderakennetta. Näin saadaan materiaali, joka sisältää ylimääräisiä negatiivisia varauksen kuljettajia. Sen kyky kuljettaa varausta on parempi kuin puhtaalla puolijohdemateriaalilla. Koska varaukset ovat negatiivisia, sanotaan materiaalia N-materiaaliksi, jonka rakenteen voi nähdä kuvasta 2. [1, s. 53–55.]



KUVA 2. N-materiaalin rakenne. Fosforiatomilla on yksi ylimääräinen elektroni, jolla saadaan elektronien ylimäärä. [1, s. 54.]

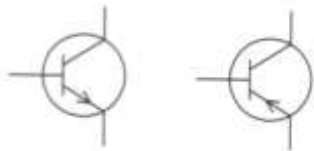
Alumiinilla seostettaessa kiderakenteeseen saadaan vajeus sidoselektronien välille. Elektronien vajeusta tarkastellaan positiivisten varausten ylimääränä. Tämä vajeus pyrkii täyttymään esimerkiksi viereisen atomin sidoselektronilla. Tällöin vajeus siirtyy toiseen atomiin ja tätä kutsutaan aukoksi. Koska ylimääräiset varaukset ovat positiivisia, materiaalia sanotaan P-materiaaliksi, jonka rakenteen voi nähdä kuvassa 3. [1, s. 53–55.]



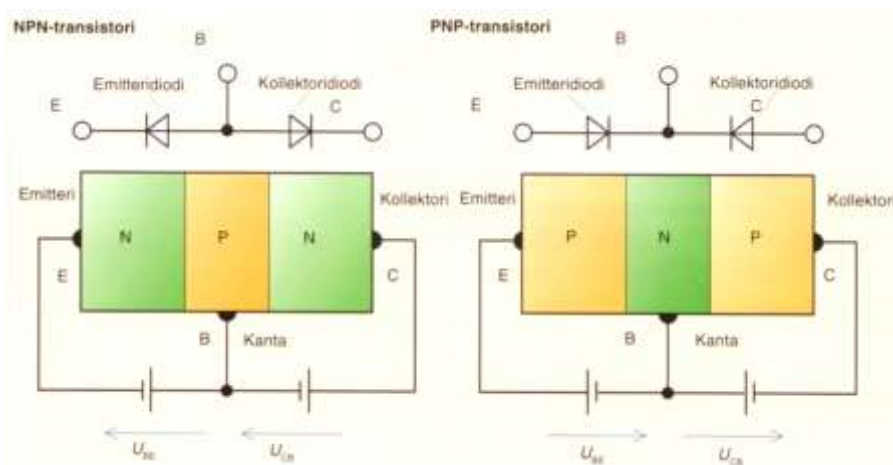
KUVA 3. P-materiaalin rakenne. Alumiiniatomilla saadaan varauksenkuljettimien ylimäärä. [1, s. 55.]

3 BIPOLAARITRANSISTORI

Bipolaaritransistoreja on kahta tyyppiä: NPN- ja PNP-bipolaaritransistoreita, joiden piirrosmerkit voi nähdä kuvassa 4. Molempien transistorityyppien puolijohde rakenteet voi nähdä kuvasta 5. Näistä kahdesta NPN on selvästi suosituimpi. Transistori ei toimi kovin hyvin kytkettäessä väärin päin, koska kummankin transistorin puolijohderakenteen koko ja seostusaste ovat erilaisia. Toimiakseen transistorin täytyy ylittää noin 0,5 V kynnyksjännite kannalla. Kun kynnyksjännite on ylitetty, ryntäävät emitterin vapaat elektronit kannalle. Tämän jälkeen on vielä toinen estokerros, jolla on kynnyksjännite, joka auttaa elektroneja syöksymään kollektorille. [1, s. 86–88.]



KUVA 4. Vasemmalla NPN-transistorin piirrosmerkki ja oikealla PNP-transistorin piirrosmerkki [1, s. 86].

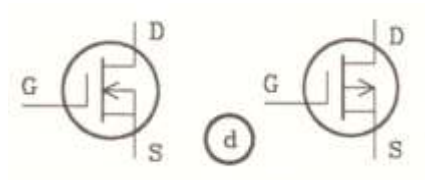


KUVA 5. NPN- ja PNP-transistorien puolijohderakenteet [1, s. 89].

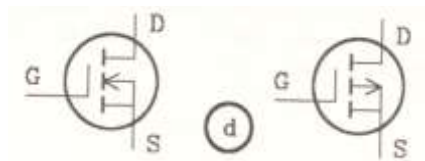
Kannalla olevat positiiviset varauksen kuljettajat (aukot) vetävät puoleensa osan emitteristä lähtevistä elektroneista, jolloin tapahtuu rekombinaatio. Rekombinaatio tarkoittaa sitä, että vapaa elektroni löytää aukon ja täyttää sen elektronivajauksen. Tämä synnyttää sähkövirran kannan ja emitterin välille. Kollektorivirta on suoraan verrannollinen kantavirtaan, ja nykyisillä transistoreilla näiden suhde on 300-kertainen. Kollektorivirran ja kantavirran suhdetta sanotaan vahvistukseksi. Vahvistuksesta käytetään lyhennettä h_{FE} . Virtavahvistus voi vaihdella eri tehotransistorien välillä. [1, s. 86–88.]

4 MOSFET

MOSFET:iä on kahta eri tyyppiä: sulku- ja avaustyyppinen. Sulkutyyppisessä komponentissa kanava suljetaan ulkoisella jännitteellä. Avaustyyppisessä komponentissa kanava avataan ulkoisen jännitteen avulla. [2, s. 44.] Alla olevissa kuvissa 6 ja 7 nähdään MOSFET:in piirrosmerkit.



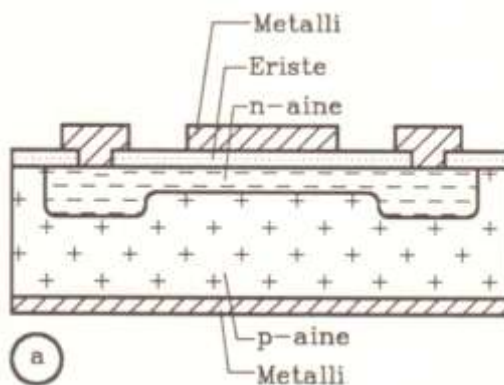
KUVA 6. Sulkutyyppisen MOSFET:in piirrosmerkki [2, s. 58].



KUVA 7. Avaustyyppisen MOSFET:in piirrosmerkki [2, s. 63].

4.1 Sulkutyyppinen MOSFET

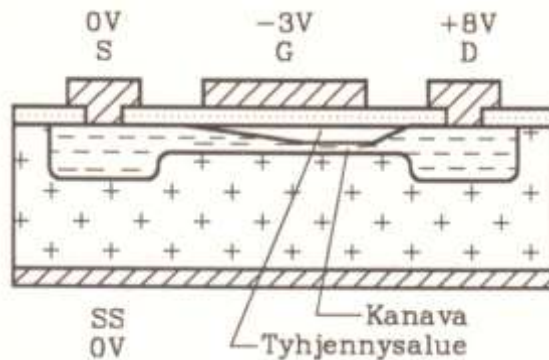
Sulkutyyppisen MOSFET:in rakenne nähdään kuvassa 8. Komponentin pohjamateriaalina on P-aineen puolijohdettä, jonka päällä on kerros N-ainetta. Puolijohde N-aineen toisessa päässä on emitteri (source, *S*), ja toisessa päässä kollektori (drain, *D*). Näiden elektrodien välissä on toimintaa ohjaava hila (gate, *G*). Elektrodit kytketään MOSFET:in metallikoskettimien avulla. Mikropiireissä ja monissa muissakin komponenteissa hilan metalli on korvattu moni kiteisellä piillä. [2, s. 58.]



KUVA 8. Sulkutyyppisen MOSFET:in rakenne [2, s. 58].

4.2 Sulkutyyppisen MOSFET:in toiminta

Kollektorilla vallitsee positiivinen jännite, hilalla negatiivinen jännite, ja emitteri on yhdistetty runkoon. Kanavan tyypillisen tyhjennysvälin voi nähdä kuvasta 9, josta selviävät myös tyypilliset kanavajännitteet. [2, s. 58.]

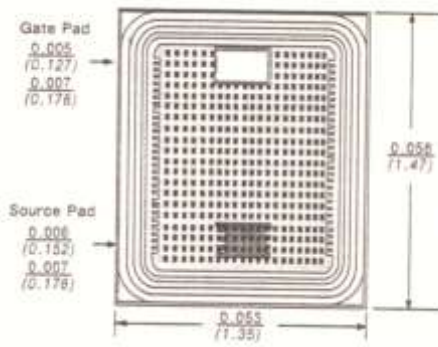


KUVA 9. Kanavajännitteet ja jännitteen aiheuttama sulkeutuminen [2, s. 58].

Hila muodostuu ohuesta, muutaman mikrometrin paksuisesta eristeestä, jonka läpi hilalle tuotu negatiivinen jännite vaikuttaa N-aineeseen. Hilalla karkotetaan negatiiviset varaukset eristekerroksen läheisyydestä, ja syntyy tyhjennysalue. Pohjamateriaalin ja tyhjennysalueen väliin jää kapea kanava, jota pitkin kanavan elektronit virtaavat kollektorille. Hilajännitteen kasvattaminen negatiiviseen suuntaan kasvattaa tyhjennysaluetta ja kaventaa kanavaa. Tällöin kollektorivirta pienenee. Muutettaessa positiiviseen jännitteeseen päin alkaa kollektorivirta kasvaa. [2, s. 58.]

Komponenttia kutsutaan sulkutyyppin transistoriksi, koska kanava on auki hilan ollessa jännitteetön. Tavalliset MOSFET:it ovat symmetrisiä, jolloin ne toimivat yhtä hyvin, vaikka kollektorin ja emitterin paikkaa vaihdettaisiin keskenään. Suurtaajuustransistoreissa ja tehotransistoreissa elektrodit on muotoiltu siten, että emitterin ja kollektorin vaihtaminen toisinpäin johtaa heikommin toimivaan komponenttiin. [2, s. 58.]

MOSFET:in kennokytkentää käytetään pienteho- ja tehotransistoreissa. Näiden komponenttien sisällä ei ole vain yhtä transistoria vaan kennosto, joka koostuu kymmenistä rinnankytketyistä transistoreista. Transistorien hilat, emitterit ja kollektorit on kytketty yhteen. Tällainen kennokytkentä on kuvassa 10. [2, s. 59.]

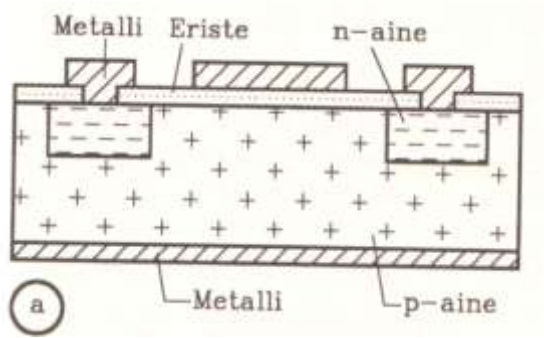


KUVA 10. Tehotransistorin kennosto [2, s. 59].

Bipolaarisia transistoreita ei voida kytkeä rinnan ilman erityiskytkentöjä, koska niissä syntyy lämpöryntäys. Lämpöryntäyksessä yksi rinnankytketyistä transistoreista lämpeenee enemmän kuin muut. Komponentin johtavuus kasvaa lämpötilan nousun seurauksena. Tämä aiheuttaa transistorissa lämpenemisen ketjureaktion, joka lopulta tuhoaa yhden rinnankytketyistä transistoreista. Muiden komponenttien tehohäviö pienenee tilapäisesti tapahtuman aikana. FET:ille ei synny lämpöryntäystä, koska jos yksi rinnankytketyistä komponenteista lämpeenee muita enemmän, tämän komponentin kanavaresistanssi alkaa kasvaa ja virta pienentyä. Vastaavasti virta siirtyy kulkemaan muiden rinnan kytkettyjen komponenttien kautta. Vaikka monet teho-FET:it koostuvat useista kymmenistä transistoreista näkyy komponentti ulospäin yhtenä transistorina. [2, s. 59.]

4.3 Avaustyyppinen MOSFET

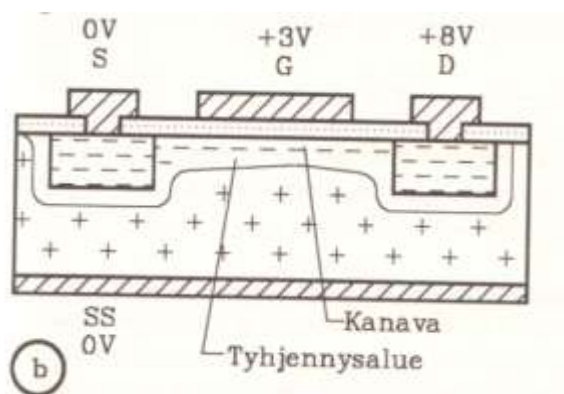
Avaustyyppisen MOSFET:in rakenne näkyy kuvassa 11. Emitteri ja kollektori muodostavat pienet N-aineesta koostuvat saarekkeet P-aineisen puolijohteen keskellä. N- ja P-aineiden välillä on hila. Hila on eristetty puolijohteesta ohuen piioksidikerroksen avulla. Jännitteet kytketään elektrodeille metallikerroksien avulla. Pohjamateriaali kytketään yleensä emitteriin, mutta se voidaan myös kytkeä omaksi elektrodiksi ja kytkeä muuhun potentiaaliin. [2, s. 62–63.]



KUVA 11. Avaustyypisen MOSFET:in rakenne [2, s. 63].

4.4 Avaustyypisen MOSFET:in toiminta

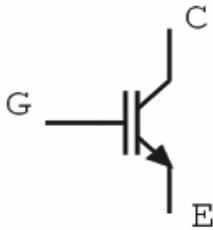
Kuva 12 havainnollistaa avastyypisen MOSFET:in toimintaa. Kollektorilla on positiivinen jännite (D), emitteri (S) on yhdistetty maahan ja hilalla (G) vaikuttaa positiivinen jännite. Positiivisen jännitteen vuoksi hilalle syntyy sähkökenttä, joka karkottaa P-aineen aukot hilan alapuolelta. Samalla se vetää elektroneja emitteriltä hilan läheisyyteen. Näin syntyy P-aineeseen kanava. Kanavassa elektronit pääsevät liikkumaan emitteriltä kollektorille. Kun hilan jännitettä kasvatetaan positiiviseen suuntaan, kasvaa samalla kanavan koko ja sitä myöten elektronien määrä. Jännitettä pienentäessä käy toisin päin, ja lopulta nollassa voltissa elektronien virtaus loppuu kokonaan. Komponentin kanava saadaan aukaistua, kun hilan jännitettä nostetaan tietyn rajan yli. [2, s. 63.]



KUVA 12. Avaustyypinen MOSFET, jossa jännitteet ja jännitteen aiheuttama tyhjennysalue [2, s. 63].

5 IGBT-TRANSISTORI

Eristehila-bipolaaritransistori eli IGBT on syönyt markkinoita tyristoreilta ja muilta transistoreilta, lukuun ottamatta kaikkein suuritehoisimpia ja suuritaajuisimpia sovelluksia [3, s. 285]. IGBT-transistori on sekoitus bipolaaritransistoria ja MOSFET:iä. Kollektorilta katsottuna IGBT-transistori näyttää bipolaaritransistorilta ja ohjauspuolelta MOSFET:iltä. Alla olevassa kuvassa 13 on IGBT-transistorin piirrosmerkki. IGBT-transistorin rakenne ja piisirun geometria muistuttavat MOSFET:iä. [5, s. 6.]



KUVA 13. IGBT-transistorin piirrosmerkki [4, s. 3].

IGBT-transistoria käytetään kytkimenä sen hyvien ominaisuuksien takia. Transistori kestää suuren virran johtavassa tilassa ja suuren jännitteen estotilassa. Kun transistori on johtavassa tilassa, jännitehäviö transistorin yli on pieni. Tällöin myös tehohäviö on pieni, eikä järeää jäähdytystä tarvita. [5, s. 6.]

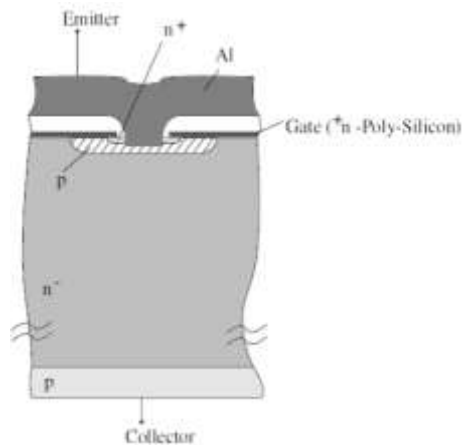
Transistoria on helppo ohjata, koska se ei tarvitse suurta ohjaustehoa. Transistorilla on nopea kytkentäaika, mutta se siirtyy hitaasti kyllästystilasta estotilaan. IGBT-transistorin siru on fyysisesti noin puolet pienempi kuin MOSFET:illä. [5, s. 6.] IGBT-transistori ei sovellu lainkaan esimerkiksi päätevahvistimeen, koska se ei ole lineaarinen komponentti [3, s. 285].

5.1 IGBT-transistorin rakenne

IGBT-transistoria on olemassa kahdenlaisella rakenteella: PT-arkkitehtuuri ja NPT-arkkitehtuuri [8, s. 4].

5.1.1 NPT-transistorin rakenne

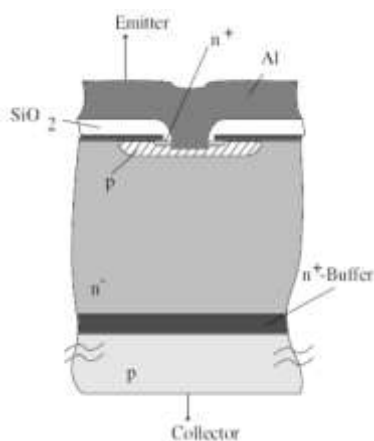
NPT-rakenteessa puolijohteen perusmateriaali on N⁻-aine ja sen molemmilla puolilla oleva P-aine, jotka on tehty komponentin valmistuksessa. Tämä on tyypillinen IGBT-rakenne. NPT-transistorin sisäinen rakenne esitetään kuvassa 14. [8, s. 4.]



KUVA 14. NPT-transistorin sisäinen rakenne [8, s. 4].

5.1.2 PT-transistorin rakenne

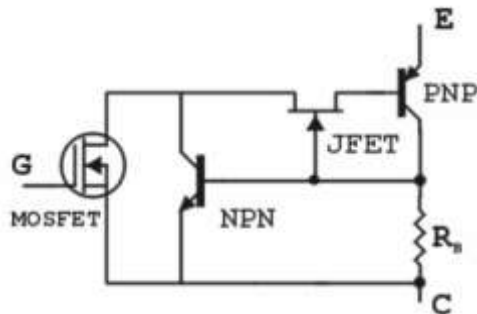
PT-rakenne muodostuu epitaksiaalisina kerroksina (epitaksiaalinen tarkoittaa kiteenkasvatustekniikkaa MBE:tä, jossa kiteitä kasvatetaan kerroksittain molekyylisuihkumenetelmällä [11]). N⁺ on puskerikerroksessa ja yhteydessä sekä yläpuolella olevaan N⁻-alueeseen että alla olevaan P-aineeseen. PT-transistorin sisäinen rakenne on kuvassa 15. [8, s. 4.]



KUVA 15. PT-transistorin sisäinen rakenne [8, s. 4].

5.2 IGBT-transistorin sijaiskytkentä

Kuvassa 16 on IGBT-transistorin yksinkertaistettu sijaiskytkentä, joka havainnollistaa IGBT-transistorin toimintaperiaatetta. IGBT-transistoria ohjaa hilalla oleva MOSFET, joten transistori ei tarvitse juurikaan ohjausenergiaa. MOSFET:illa ohjataan kytkimenä toimivaa PNP-transistoria. Normaalisti NPN-transistori on estotilassa. Joissakin IGBT-transistoreissa saattaa olla MOSFET:in nielun ja PNP-transistorin kannan välissä JFET-tyyppinen rakenne, joka vaikuttaa siirryttäessä johtavan tilan ja estotilan välillä. Yleensä MOSFET on N-kanavainen ja transistori NPN-tyyppinen. [3, s. 285–286.]



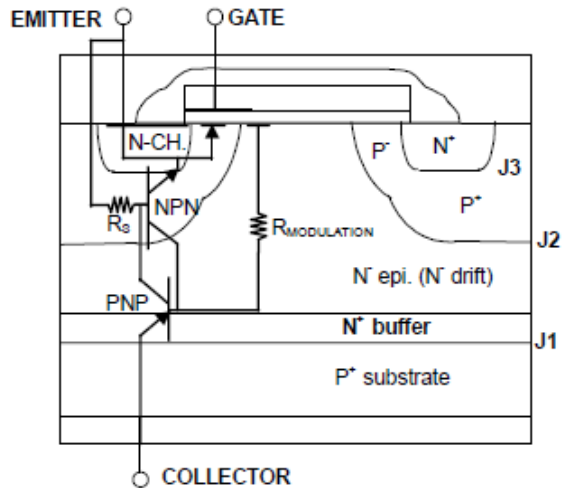
KUVA 16. IGBT-transistorin sijaiskytkentä [4, s. 3].

5.3 IGBT-transistorin kytkeytyminen johtavaan tilaan ja estotilaan

Seuraavassa alaluvussa tutustutaan siihen, mitä IGBT-transistorin sisällä tapahtuu, kun se kytetään johtavaan ja johtamattomaan tilaan.

5.3.1 Kytkeytyminen johtavaan tilaan

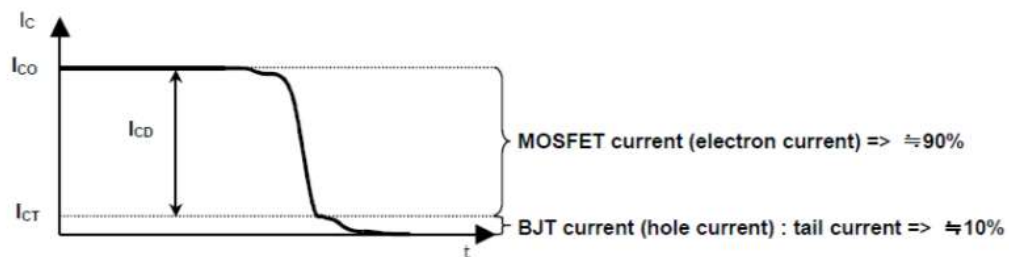
Alkutilanteessa IGBT-transistori on johtamattomassa tilassa. IGBT-transistori saadaan johtavaan tilaan, kun hilan kynnsjännite ylitetään. Hilalla oleva P-aine vaikuttaa alla olevaan N-aineeseen, johon muodostuu N-tyyppinen kanava, jota pitkin virta alkaa kulkea. Kun P^+ -aineen ja N^- -aineen rajalla J1 (ks. kuva 17) jännite ylittää 0,7 V, alkaa elektroneja virrata N^+ -aineelta N^- -aineelle. IGBT-transistorissa P^+ -alueen aukot kuljettavat emitterille kahdenlaista virtaa. Ensimmäinen on elektronien virta, joka kulkee kanavan läpi, kuin MOSFET:issa. Toinen on aukkojen kuljettama virta, kuin bipolaaritransistorissa, joka kulkee P^+ -alueen ja N^- -alueen läpi (ks. kuva 17). [7, s. 11.]



KUVA 17. IGBT-transistorin sisäinen rakenne sijaiskytkennällä [7, s. 3].

5.3.2 Kytkeytyminen estotilaan

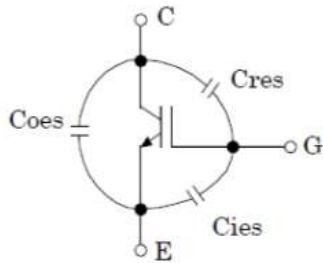
Laitettaessa IGBT-transistoria johtamattomaan tilaan voidaan hila ja emitteri kytkeä oikosulkuun tai alkaa pienentää hilalla olevaa jännitettä. Hilajännitteen pudotessa alle kynnysjännitteen alkaa vähemmistövarauksenkuljettajien määrä pienentyä. IGBT-transistoria ei voi kytkeä nopeasti pois päältä vähemmistövarauksenkuljettajien suuren määrän vuoksi. Kun kuljettajien määrä vähenee, kollektorivirta alkaa aluksi vähentyä hitaasti ja vähän ajan päästä nopeammin (ks. kuva 18). [7, s. 11.]



KUVA 18. Kollektorivirta IGBT:en siirtyessä estotilaan [7, s. 11].

5.4 IGBT-transistorin kapasitanssi

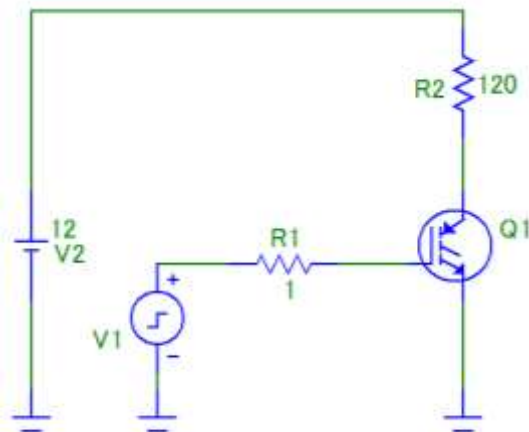
Kuvasta 19 nähdään, että jokaisella IGBT-liitoksella on omat kapasitanssinsa: hila-emitterin sisääntulokapasitanssi on C_{eis} , kollektori-emitterin ulostulokapasitanssi on C_{eos} , ja kollektori-hilan kapasitanssi on C_{res} . [6, s. 18.]



KUVA 19. IGBT-transistorin jalkojen kapasitanssit [6, s. 18].

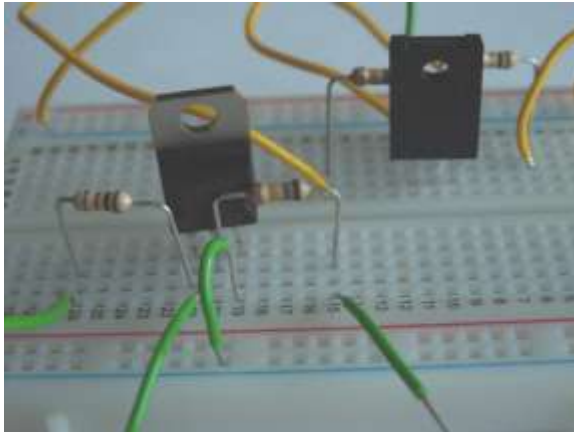
6 IGBT-TRANSISTORIN TESTIKYTKENTÄ

Aluksi testikytkeä oli tarkoitus simuloida LTSpice-simulointiohjelmalla. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, koska ei löytynyt valmiita komponentteja. Sen sijaan testikytkenät tehtiin oikeilla IGBT-transistorin komponenteilla. Testikytkenän piirikaavio on kuvassa 20.



KUVA 20. Testikytkenän piirikaavio.

Kuvassa 21 on varsinainen mittauskytkentä, joka tehtiin koekytkeäalustalle.



KUVA 21. IGBT-transistorit koekytkeäalustalla.

6.1 IGBT-transistorin johtamiskäyrämittaus

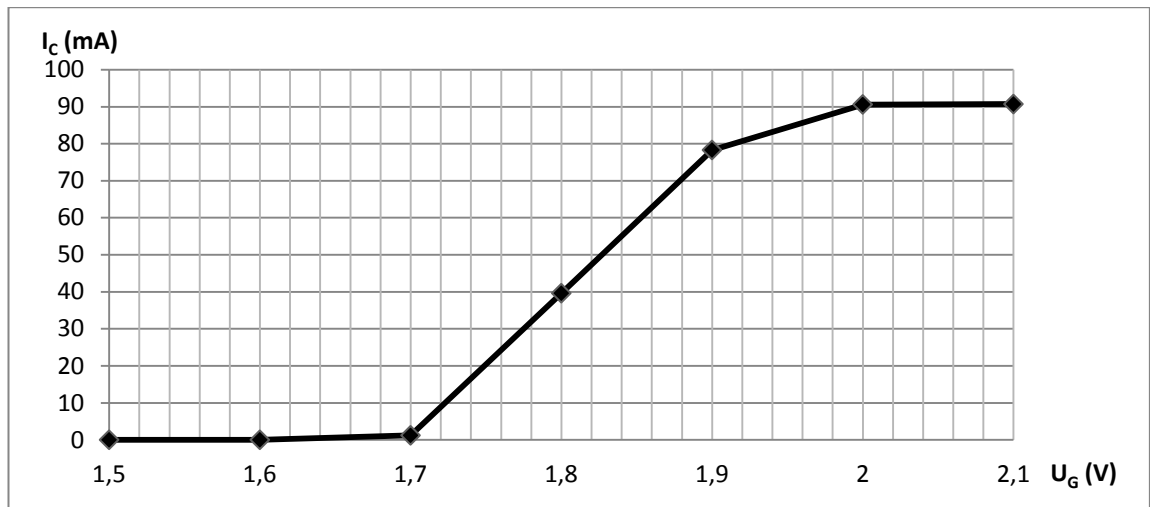
IGBT-transistorista STGF7NB60SL mitattiin kollektorivirta hilajännitteen funktiona. Mittaus suoritettiin kytkemällä kuvan 20 piirikaavioon vastuksen R2 ja jännitelähteen V2 väliin virtamittari. Kollektorivastuksena oli 120 Ω vastus. Hilajännitettä nostettiin

0,1 V:n askelin ylöspäin riittävän tarkkuuden aikaansaamiseksi. Mittaustuloksia kirjoitettiin tarkemmin muistiin siitä kohdasta lähtien, kun IGBT alkoi johtaa. Tulokset on koottu taulukkoon 1.

TAULUKKO 1. Mitattu hilajännite ja kollektorivirta STGF7NB60SL-transistorista.

U_G (V)	I_C (mA)
1,5	0,1
1,6	0,4
1,7	1,2
1,8	39,6
1,9	78,3
2	90,6
2,1	90,7

Taulukossa 1 olevat arvot syötettiin Excel-tilukkolaskentaohjelmaan, ja arvoista saatiin seuraavanlainen kuvaaja (ks. kuva 22).



KUVA 22. IGBT-transistorin STGF7NB60SL ohjausjännitteen aikaansaama kollektorivirta.

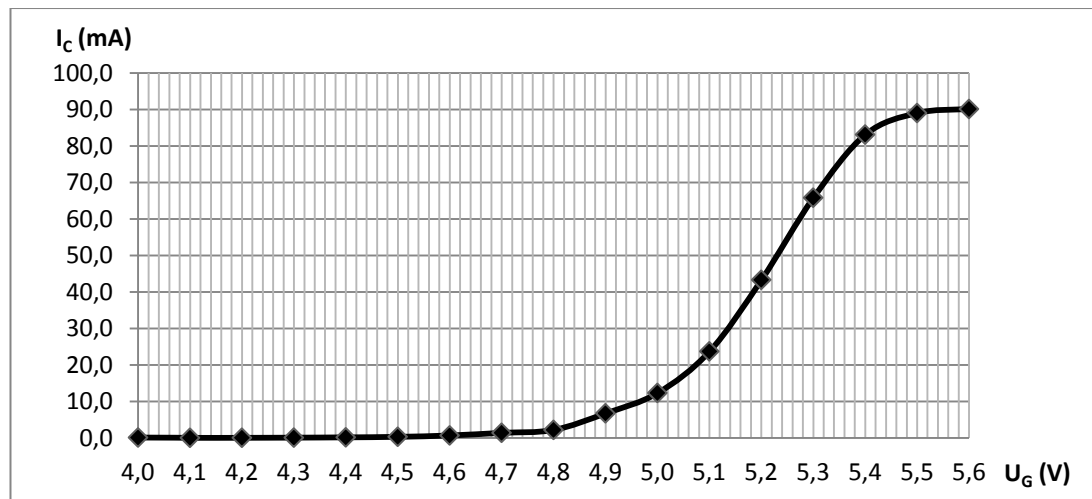
Kuvasta 22 nähdään, kuinka IGBT-transistori alkaa johtaa hilajännitteen noustessa yli 1,7 V.

IGBT-transistori STGP6NC60HD:sta mitatut kollektorivirrat ja jännitteet on koottu taulukkoon 2. Mittaus tehtiin kuten edellä.

TAULUKKO 2. Hilan jännite ja kollektorivirta STGP6NC60HD-transistorista.

U_G (V)	I_C (mA)
4,0	0,1
4,1	0,0
4,2	0,0
4,3	0,1
4,4	0,2
4,5	0,3
4,6	0,7
4,7	1,4
4,8	2,2
4,9	6,7
5,0	12,3
5,1	23,7
5,2	43,3
5,3	65,8
5,4	83,1
5,5	89,0
5,6	90,1

Taulukon 2 arvoista tehtiin kuvaaja 23 Excel-tilukkolaskentaohjelmalla.

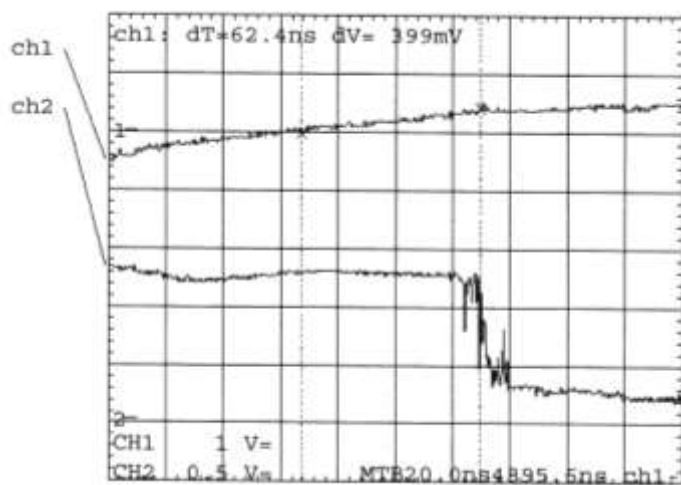


KUVA 23. IGBT-transistorin STGP6NC60HD ohjaujännitteen aikaansaama kollektorivirta.

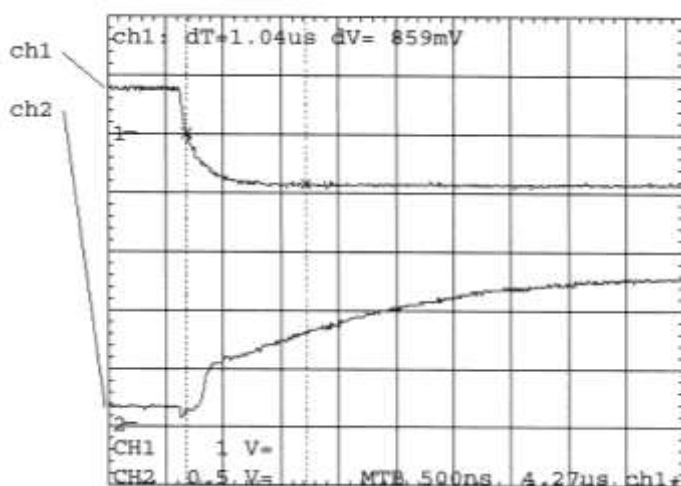
Kuvasta 23 nähdään, että STGP6NC60HD alkaa johtaa, kun jännite nousee yli 4,8 V:n.

6.2 IGBT-transistorin kytkeytymisviive ja katkaisuviive

IGBT-transistorista STGF7NB60SL mitattiin kytkeytymisviive ja katkaisuviive. Mittaus suoritettiin kytkemällä ohjaussignaali funktiogeneraattorista hilalle. Funktiogeneraattorin ohjausjännite vaihteli välillä ± 8 V. Kaikissa oskilloskoopin mittapäissä oli kymmenkertainen vaimennus. Mittauspisteet sijaitsivat puolessavälissä signaalin vaihtaessa tilaansa. Hilalta mitattiin ohjaussignaali, joka on kuvissa 24 ja 25 ylempänä signaalina. IGBT-transistorin kollektorilta mitattiin kytkeytymis- ja katkaisuviiveet, jotka ovat kuvissa 24 ja 25 alempana signaaleina.



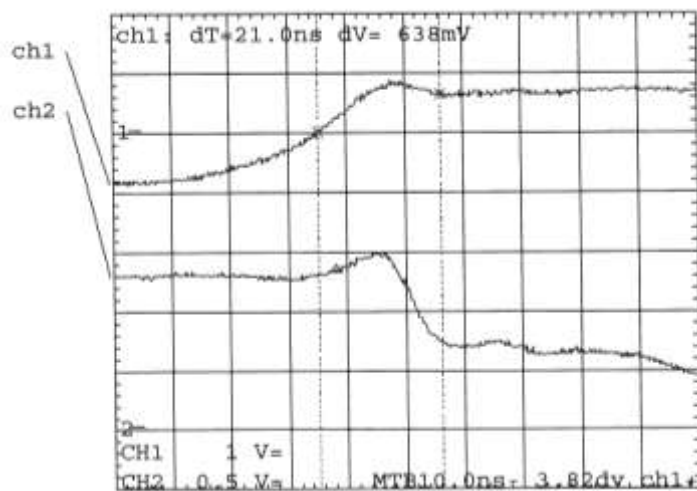
KUVA 24. STGF7NB60SL-transistorin kytkeytymisviive.



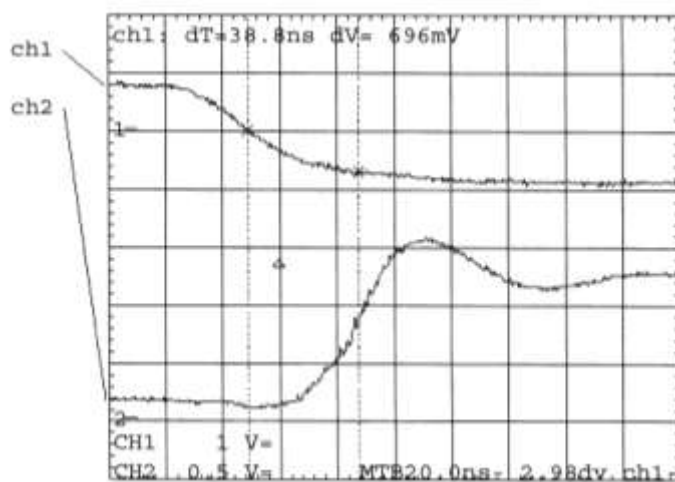
KUVA 25. STGF7NB60SL-transistorin katkaisuviive.

Yllä olevista kuvista nähdään, että transistorin kytkeytymisviive mitatussa testikytkennässä on noin 62 ns ja katkaisuviive noin 1 μ s. Edellä olevia tuloksia verrataan transistorin datalehdessä oleviin tuloksiin. Saadaan datalehdessä kytkeytymisviiveeksi 1,1 μ s ja katkaisuviiveeksi 5,2 μ s [10, s. 3]. Datalehdessä arvot ja mittausten arvot eroavat paljon toisistaan. Eroavaisuuteen vaikuttavia seikkoja ovat muun muassa kytkentälevyn käyttö ja erilaiset mittauksessa käytetyt jännitearvot. Mistä kohtaa mittauspisteet alkavat ja loppuvat datalehdessä jäivät epäselväksi.

Kuvissa 26 ja 27 näkyvät STGP6NC60HD-transistorin kytkeytymisviive ja katkaisuviive. Mittaus suoritettiin samalla tavalla kuin edellä.



KUVA 26. STGP6NC60HD-transistorin kytkeytymisviive.

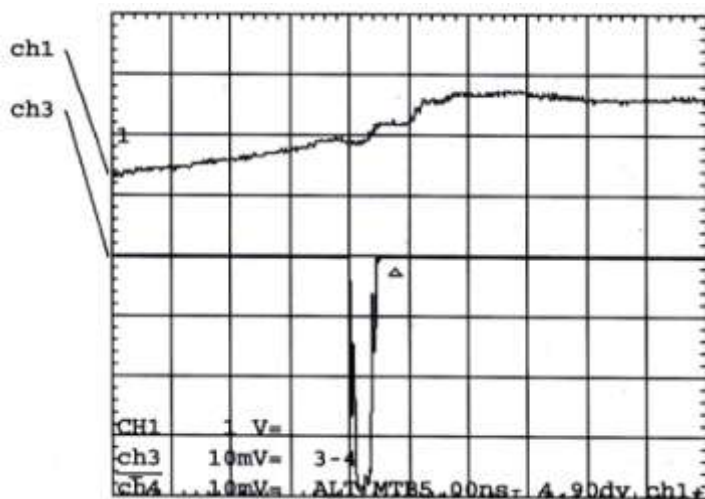


KUVA 27. STGP6NC60HD-transistorin katkaisuviive.

Yllä olevista kuvista nähdään, että transistorin kytkeytymisviive on 21 ns ja katkaisuviive on 38 ns. Datalehdessä transistorin kytkeytymisviive on 12 ns ja katkaisuviive on 40 ns [9, s. 5]. Kun verrataan kytkeytymisaikoja toisiinsa, huomataan, että todelliset arvot ja mitatut arvot ovat melko lähellä toisiaan. Testauskytkennässä ja datalehdessä mittauksissa eroavaisuudet ovat samanlaiset, kuin edellä.

6.3 IGBT-transistorin hilavaraus

IGBT-transistorin hilalle kytkettiin 1Ω vastus, jonka molemmilta puolilta mitattiin jännitteet oskilloskoopilla. Toiselle mittapäälle tehtiin invertointi, ja lopuksi signaalit vähenettiin toisistaan.



KUVA 28. STGP6NC60HD-transistorin hilavaraus.

IGBT-transistorin hilavaraukseksi saatiin laskemalla 100 pC. Datalehdessä hilavaraukseksi annettiin 13,6 nC [9, s. 4]. Mitatut arvot ja datalehdessä annetut arvot poikkeavat paljon toisistaan. Tämän eron syy jäi epäselväksi.

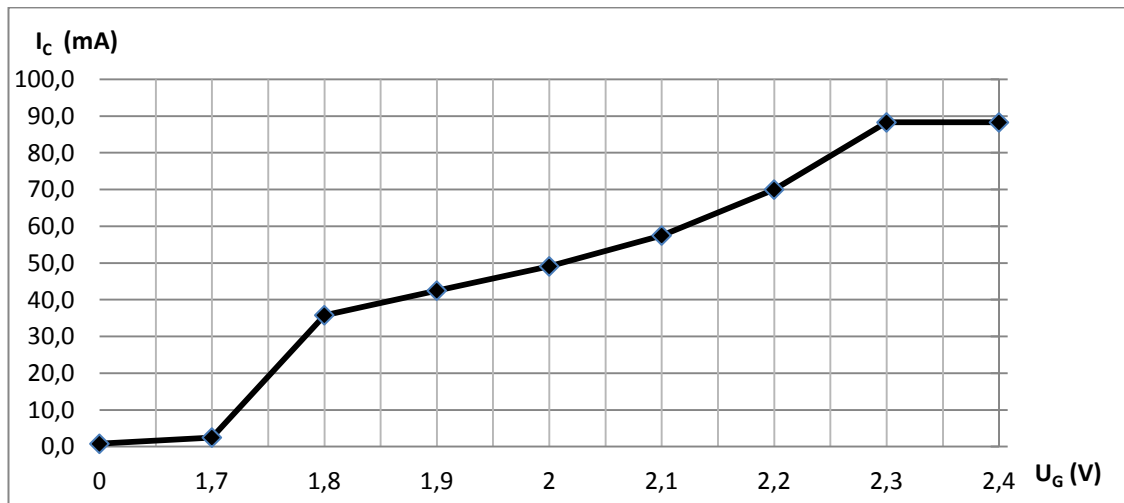
6.4 Saturaatiojännite

IGBT-transistorista STGF7NB60SL mitattiin saturaatiojännite kollektorivirran funktiona ja transistorin saturaatiojännite hilajännitteen funktiona. Saturaatiojännite mitattiin jännitemittarilla, ja hilan jännite saatiin jännitelähteen näytöstä. Mittaustulokset ja laskettu kollektorivirta on koottu taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. STGF7NB60SL-transistorin saturaatiojännite ja hilajännite.

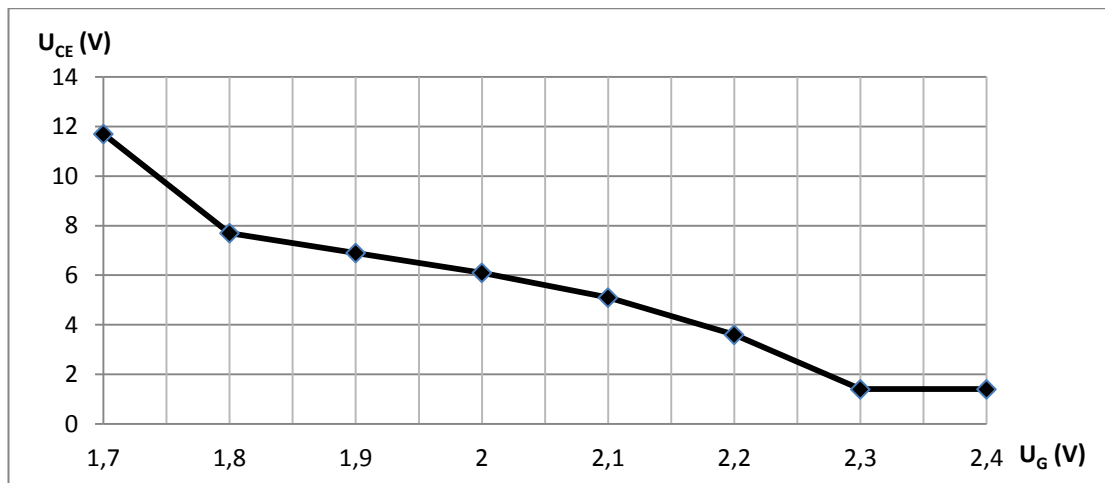
U_G (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)
1,7	11,7	2,5
1,8	7,7	35,8
1,9	6,9	42,5
2	6,1	49,1
2,1	5,1	57,5
2,2	3,6	70,0
2,3	1,4	88,3
2,4	1,4	88,3

Taulukon 3 saturaatiojännitteen ja virran arvot syötettiin Excel-
taulukkolaskentaohjelmaan, ja niistä saatiin seuraavanlainen kuvaaja (ks. kuva 29).



KUVA 29. STGF7NB60SL-transistorin saturaatiojännite kollektorivirran funktiona.

Tämän jälkeen Excel-taulukkolaskentaohjelmaan syötettiin saturaatiojännitteen ja hila-
jännitteen arvot, joista saatiin seuraavanlainen kuvaaja (ks. kuva 30).



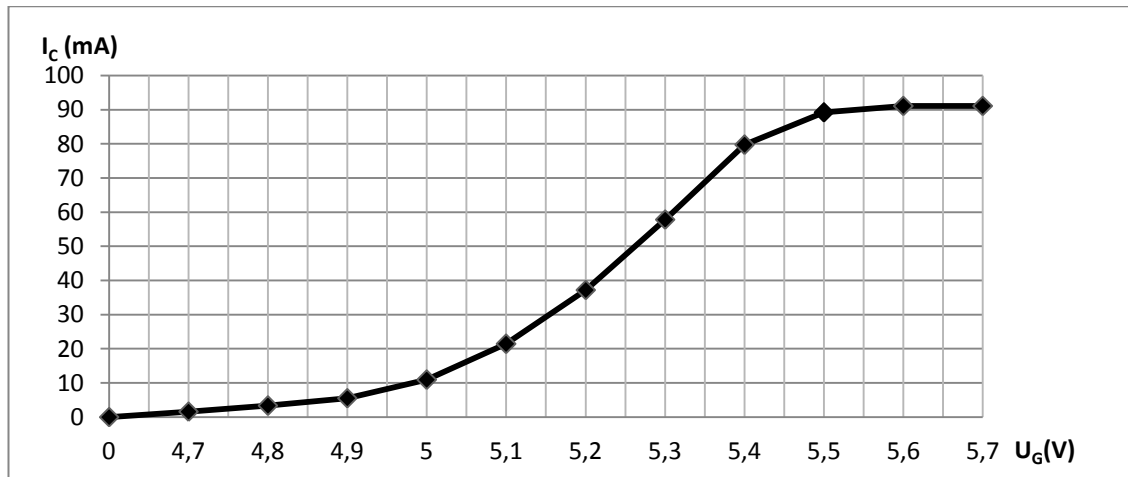
KUVA 30. STGF7NB60SL-transistorin saturaatiojännite hilajännitteen funktiona.

Myös IGBT-transistorista STGP6NC60HD mitattiin hila- ja saturaatiojännitteet. Mittaus tehtiin samalla tavalla kuin edellä. Tulokset on koottu taulukkoon 4.

TAULUKKO 4. STGP6NC60HD-transistorin hilajännite ja saturaatiojännite.

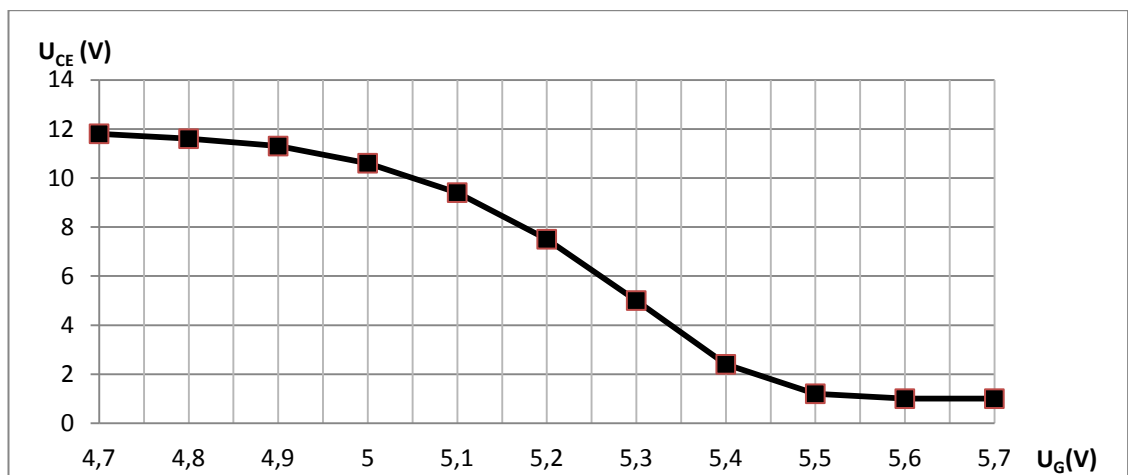
U_G (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)
4,9	11,3	5,5
5,0	10,6	10,9
5,1	9,4	21,4
5,2	7,5	37,2
5,3	5,0	57,8
5,4	2,4	79,7
5,5	1,2	89,2
5,6	1,0	91,1
5,7	1,0	91,1

IGBT-transistorin STGP6NC60HD saturaatiojännitteen ja kollektorivirran arvot syötettiin Excel-tilukkolaskentaohjelmaan, josta saatiin seuraavanlainen kuvaaja (ks. kuva 31).



KUVA 31. Transistorin STGP6NC60HD saturaatiojännite kollektorivirran funktiona.

Tämän jälkeen Excel-tilukkolaskentaohjelmaan syötettiin taulukon 4 saturaatiojännitteen ja hilajännitteen arvot, joista saatiin seuraavanlainen kuvaaja (ks. kuva 32).



KUVA 32. STGP6NC60HD-transistorin saturaatiojännite hilajännitteen funktiona.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutustua IGBT-transistorin rakenteeseen ja toimintaan. Sekä IGBT-transistorin, MOSFET:in ja transistorin toiminta perustuu puolijohteisiin. IGBT-transistorin toiminta perustuu ohjauspuolelta MOSFET:in toimintaan ja kollektorin puolelta transistorin toimintaan. IGBT-transistoria on olemassa kahdenlaisella rakenteella: PT-arkkitehtuurilla ja NPT-arkkitehtuurilla. Lisäksi työssä tutustuttiin IGBT-transistorin sijaiskytkentään. IGBT-transistorin toimintaa todettiin mittaamalla IGBT-transistorin johtamiskäyrä, kytkeytymisviive ja katkaisuviive sekä hilavaraus. Kehittämisehdotuksena olisi IGBT-transistorikytkentä, jota ohjataan mikrokontrollerilla. Mikrokontrollerilla voisi ohjata esimerkiksi askelmoottoria.

LÄHTEET

Kirjalliset lähteet:

- [1] Johnsson, B. & Lindell, B. 2003. Elektroniikka 2000. Oppikirja peruskurssi. 4. painos. Iisalmi: IS-VET.
- [2] Salo, P. 2001. Analogista elektroniikkaa. Periaatteita ja sovelluksia. 1–4 painos. Keuruu: Otava.
- [3] Silvonen K. 2009. Elektroniikka ja puolijohdekomponentit. Analogia- ja digitaali-tekniikka, vahvistimet, tehollähteet, suodattimet, teho- ja tietoliikenne-elektroniikka, piirisimulointi. Helsinki: OTATIETO.

Sähköiset lähteet:

- [4] Abdus Sattar. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics. IXYS Corporation. Luettu 15.1.2013
http://www.ixys.com/Documents/AppNotes/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf
- [5] Esala, M. Transistoreiden merkinnät. Luettu 12.12.2012
<http://www.kolumbus.fi/mikko.esala/transistorit.pdf>
- [6] FUJI IGBT MODULES APPLICATION MANUAL. 2004. Päivitetty 22.10.2013
http://www.fujielectric.com/products/semiconductor/technical/application/box/doc/REH984b/REH984b_a.pdf
- [7] IGBT Basics 1. FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. 2001. Luettu 16.1.2013
<http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9016.pdf>
- [8] Siemens IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Semiconductor Group. Päivitetty 22.10.2013
<http://www.infineon.com/dgdl/Infineon+-+Application+Note+-+IGBT+-+Differences+Between+MOSFET+and+IGBT.pdf?folderId=db3a30433a047ba0013a69f8f64c0705&fileId=db3a30433f565836013f5ca72d4e29db>
- [9] STGB6NC60HD-STGB6NC60HD-1-STGF6NC60HD-STGP6NC60HD. STMicroelectronics. Luettu 19.10.2013
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/198247/STMICROELECTRONICS/STGB6NC60HD.html>
- [10] STGF7NB60SL. STMicroelectronics. Luettu 21.10.2013
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00003578.pdf>
- [11] Valosta on sähkön syrjäyttäjäksi. 2008. Luettu 11.3.2013
<http://www.aka.fi/fi/Apropos/Artikkelit/Tutkija-tyossaan/Valosta-on-sahkon-syrjayttajaksi/>