

MOSFET-transistorin vaihtoehtoiset materiaalit ja tekniikat

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Tietotekniikka
Maaliskuu 2024
Pinja Pelkonen

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

PINJA PELKONEN: MOSFET-transistorin vaihtoehtoiset materiaalit ja tekniikat

TkK-tutkielma, 20 s.
Tietotekniikka
Maaliskuu 2024

MOSFET eli metallioksidipuolijohdekanavatransistori (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) on puolijohteisiin perustuva kytkimenä toimiva komponentti. Pii-MOSFET on ylivoimaisesti yleisin transistorityyppi. Nykyelektroniikassa käytetyt transistorit ovat lähes poikkeuksetta MOSFETeja.

Transistorien kehittämisessä ollaan kiinnostuneita niiden tehokkuuden ja toiminta-alueen parantamisesta sekä tuotantokustannusten laskemisesta. Pii-MOSFETin kehittämistä rajoittavat sen materiaalit, rakenne ja tekniikka. MOSFETin toiminta-alueita on mahdollista parantaa vaihtoehtoisilla puolijohdemateriaaleilla. Transistorien tehokkuuden parantaminen ja tuotantokustannusten laskeminen kuitenkin vaatii transistorin rakenteen ja tekniikan muuttamista, koska MOSFETin teoreettinen maksimitehokkuus on likimain saavutettu.

Tässä tutkielmassa perehdytään transistorien kehitykseen, MOSFETin toimintaperiaatteseen sekä esitellään joitakin tärkeimpiä MOSFETin vaihtoehtoisia puolijohdemateriaaleja ja kanavatransistorin tekniikoita.

Asiasanat: MOSFET, transistori, FinFET, Spin-FET, CNTFET, TFET, SET, GaN-FET, SiC-FET

Sisällys

1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuskysymykset	1
1.2 Tutkimusmenetelmät	2
2 Transistorien kehitys	3
3 MOSFET	7
3.1 Puolijohteet	7
3.2 Diodi	8
3.3 MOSFETin toiminta	8
3.4 MOSFETin heikkoudet	10
4 Tulevaisuuden transistorit	12
4.1 Transistorimateriaalit	12
4.2 Transistorimekaniikat	13
5 Yhteenveto	19
Lähdeluettelo	21

1 Johdanto

Modernin elektroniikan kulmakivi on transistori, jonka kehittyminen on mahdollistanut tietokoneen kutistumisen huoneen kokoisesta sormukseen mahtuvaksi. Transistori voi toimia virtapiirissä kytkimenä tai vahvistimena. Esimerkiksi RAM-muistissa yhtä bittiä kohti on 6 transistoria. 99,9 % maailman transistoreista ovat MOSFETeja eli metallioksidipuolijohdekanavatransistoreita [1]. Elektroniikan tehokkuus riippuu siis vahvasti MOSFETin tehokkuudesta.

MOSFETin kehitys on hidastumassa. Sen rinnalle on jo pitkään etsitty ja kehitetty muilla materiaaleilla ja mekaniikoilla toimivia transistoreita. Uusien materiaalien ansiosta MOSFETin käyttömahdollisuudet ja tehokkuus kasvavat. Toisenlaisilla mekaniikoilla voidaan puolestaan ratkaista nykyinen transistorien skaalausongelma, jossa on kyse nykyisten transistorimekaniikkojen toimimattomuudesta pienemmällä mittakaavalla. Pienemmät transistorit mahdollistavat pienempien laitteiden lisäksi huomattavasti tehokkaampaa, energiatehokkaampaa ja nopeampaa elektroniikkaa pienemmällä määrällä resursseja. [2]

1.1 Tutkimuskysymykset

1. Miten MOSFET toimii?

MOSFETin toiminnan ymmärtäminen on oleellista, jos halutaan ymmärtää sen heikkouksia ja rajoitteita. Transistorit asettavat rajoituksia niiden käyttökohteille eli kaikelle modernille elektroniikalle.

2. Mitä vaihtoehtoisia materiaaleja ja tekniikoita MOSFETille on?

Vaikka pii on verrattain halpa transistorimateriaali, se asettaa rajoituksia transistorin toiminta-alueelle. Viimeisen vuosikymmenen aikana markkinoille on tullut ominaisuuksiltaan paremmista materiaaleista valmistettuja MOSFETeja. Vaihtoehtoisten materiaalien käyttö on kuitenkin vielä marginaalista, etenkin niiden verrattain korkean hinnan takia. Vaihtoehtoisia tekniikoita MOSFETille on kehitetty jo useita vuosikymmeniä. Kuitenkin vasta viime vuosien aikana erityisesti kvanttimekaniikan ilmiöitä hyödyntävien transistorien tutkimus on yleistynyt.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tiedonhaussa käytetyt tietokannat hakusanoineen on esitetty taulukossa 1.1.

Google Scholarista on etsitty tietoa transistorien historiasta.

Kirjastosta on etsitty tietoa puolijohteista, MOSFETin ja TFETin toiminnasta

IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tietokannasta on etsitty tietoa MOSFET-transistorin heikkouksista, eri transistorimateriaaleista ja eri transistorimekaniikoista. Tätä tietokantaa käytettiin tiedon etsimiseen paljon, koska sieltä löytyi paljon tietoa elektroniikkakomponenteista.

Taulukko 1.1: Tiedonhaussa käytetyt tietokannat hakusanoineen

Tietokanta	Hakusana
Google Scholar	MOSFET
IEEE	MOSFET AND (SiC OR GaN)
IEEE	quantum AND FET
IEEE	TFET AND review
IEEE	spin AND FET
IEEE	GFET OR CNTFET

2 Transistorien kehitys

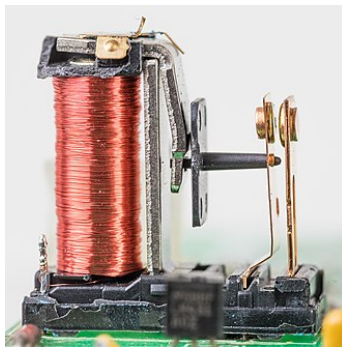
Tietojenkäsittelylaitteissa transistoria edelsivät mekaaniset, sähkömekaaniset ja sähköiset kytkimet. Mekaanisia kytkimiä käytettiin esimerkiksi jo 1600-luvulla Pascalin laskimessa, jossa voimalähteenä toimi käyttäjän lihasvoima. Ajan myötä tietojenkäsittelykoneista tuli monimutkaisempia ja niillä pystyttiin käsittelemään tietoa monimutkaisemmin. 1800-luvulla matemaatikko Charles Babbagen suunnitteli differenssikoneen, joka olisi laskenut vastauksia polynomisiin yhtälöihin. Toimivaa konetta ei koskaan kuitenkaan valmistunut valmistusvaikeuksien takia. 1800-luvun lopulla tilastotieteilijä Herman Hollerithin suunnittelema reikäkorttikone lajitteli ja laski tietoa Yhdysvaltojen väestönlaskennassa. 1930-luvulla otettiin käyttöön ensimmäiset sähkömekaanisilla kytkimillä toimivat tietokoneet. [3]

Rele on sähkömekaaninen kytkin. Se voidaan sulkea tai avata sähkövirralla, joka magnetisoi sen. Rele on esitetty kuvassa 2.1(a). Releillä voitiin jo luoda loogisia portteja. Nopeutta rajoittava tekijä releessä on mekaanisten osien liikemäärä. Mekaanisten osien takia releiden kytkimet saattoivat myös juuttua paikoilleen. 1930-luvun lopussa insinööri Konrad Zuse rakensi ensimmäisen releitä käyttävän tietokoneen Z3, joka on esitetty kuvassa 2.2(a). Releen syrjäytti 1940-luvun puolivälissä yleistynyt elektronivakuumiputki. [3]

Elektroniputki on elektronien liikkeeseen perustuva kytkin tai vahvistin. Elektroniputki on putki, johon on jätetty pieni määrä jalokaasua. Elektroniputki on esitetty kuvassa 2.1(b). Elektroniputki on tuhatkertaisesti relettä nopeampi. Elektro-

niputkessa mekaanisen liikkeen korvasi elektronien liike. 1940-luvulla otettiin käyttöön ensimmäinen elektroninen tietokone COLOSSUS, jonka suunnitteli matemaatikko Alan Turing. Britannian hallinto rakennutti tietokoneen natsien salakirjoituksen purkuun. Elektroniputken syrjäytti 1950-luvun puolivälissä yleistynyt transistori. [3]

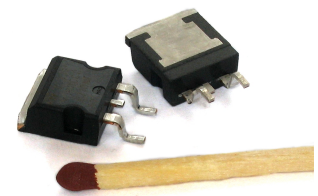
Transistori on puolijohteesta valmistettu kytkin tai vahvistin. Sen kehitys valmistui 1948. Sen toiminta perustuu siihen, että puolijohteen sähkönjohtokyky voidaan kytkeä päälle tai pois jännitteellä. Transistori on esitetty kuvassa 2.1(c). Transistorit olivat huomattavasti pienempiä, nopeampia ja edullisempia kuin edeltäjänsä. Transistorin keksimisen merkitys tunnustettiin jo 1956 fysiikan Nobelin palkinnolla. Transistoria pidetään 1900-luvun tärkeimpänä teknologian kehitysaskeleena, koska se mahdollisti pienten ja matalakustannuksisten elektroniikkalaitteiden laajan kehittämisen ja valmistamisen. [3]



(a) Rele [4]



(b) Elektroniputkia. Elektroniputkien koko pieneni ajan myötä. [5]

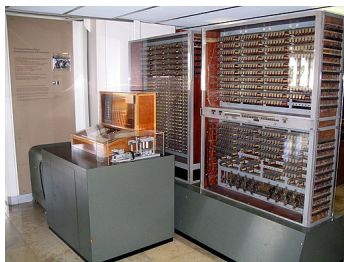


(c) Nykyaikaisia transistoreita [6]

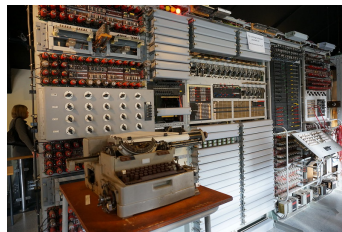
Kuva 2.1: Erilaisia kytkimenä ja vahvistimena toimineita komponentteja

Transistorit olivat elektronivakuumputkia monella tapaa parempia. Transistorien määrän kasvaessa, ongelmaksi muodostui niiden tuottama lämpö, joka vahingoitti muita komponentteja. Myös transistorien kasvavan määrän vuoksi tarvittiin

yksinkertainen tapa kytkeä tuhansia transistoreita virtapiiriin. Tätä varten 1960-luvulla alkoivat kehittymään integroidut piirit. Niihin voi kuulua tuhansista miljardeihin transistoreihin muiden komponenttien lisäksi. Ensimmäinen integroidulla piirillä toimiva tietokone IBM 360 Model 91 julkaistiin vuonna 1966. Se on esitetty kuvassa 2.2(c). Nykyiset älypuhelimet ovat laskentateholtaan miljoonia kertoja tätä tietokonetta tehokkaampia. [3]



(a) Z3 [7]



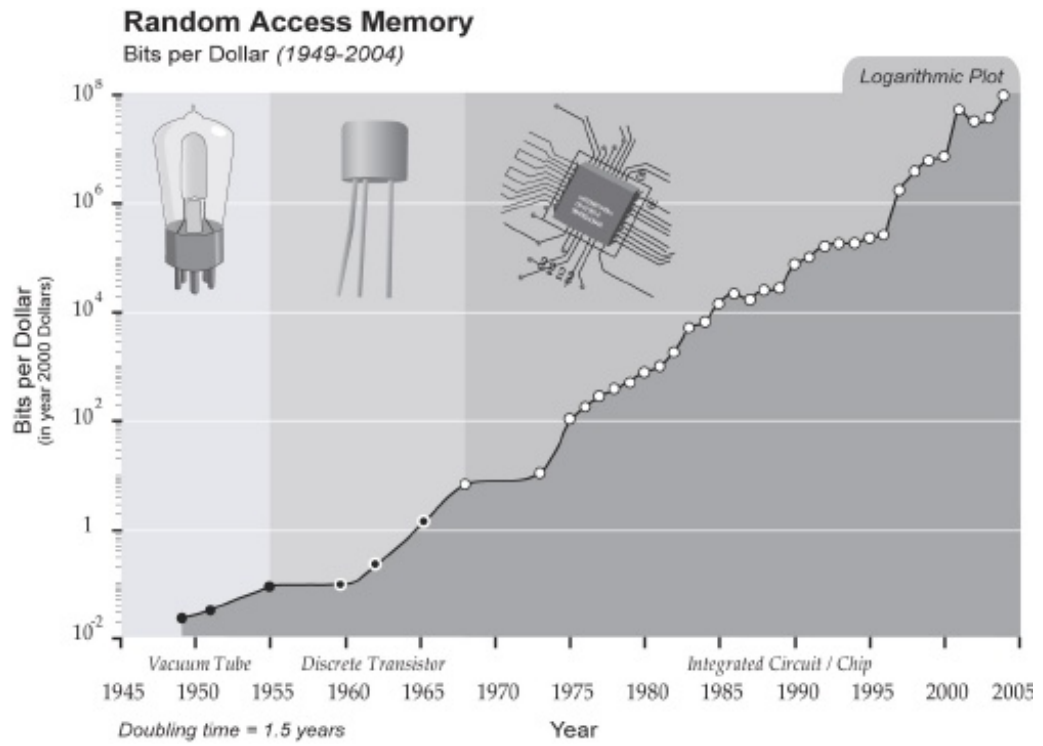
(b) COLOSSUS [8]



(c) IBM 360 Model 91 [9]

Kuva 2.2: Erilaisilla kytkimillä toimivia tietokoneita

Ajan myötä transistorien koon pienentyessä myös niiden hinta on jatkuvasti laskenut. Kuvassa 2.3 on ajan funktiona esitetty, montako bittiä RAM-muistia saa dollarilla. 50-luvulla elektroniputkilla yksi bitti maksoi useita dollareita, 70-luvulla mikropiirissä 0,1 dollaria ja vuonna 2005 mikropiirissä 0,00000001 dollaria.



Kuva 2.3: RAM-muistin hinnan kehitys ajan funktiona [10]

3 MOSFET

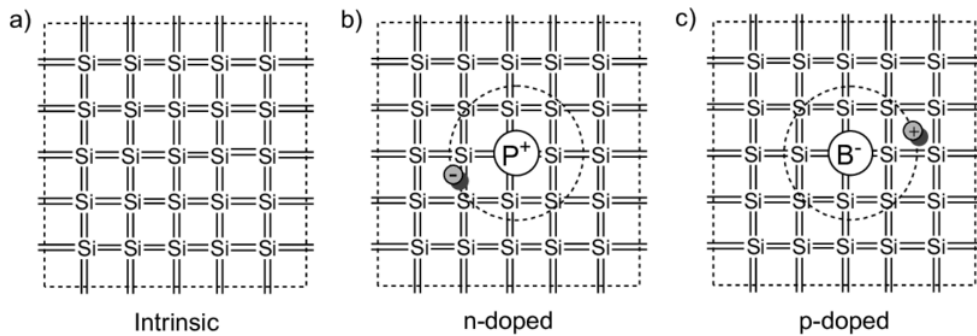
MOSFET eli metallioksidi-puolijohdekanavatransistori on ylivoimaisesti yleisin transistorityyppi. Sen nimi tulee sanoista Metal Oxide Field Effect Transistor. Puolijohdekanavatransistoria kutsutaan yleisemmin nimityksellä FET, joka ei määrittele onko eriste metallioksidi vai muu eriste.

3.1 Puolijohdeet

Puolijohdeet ovat materiaaleja, joissa elektronit eivät voi liikkua yhtä vapaasti kuin metalleissa, mutta vapaammin kuin eristeissä. Tämä johtuu siitä, että puolijohdeissa alempi elektronivyö on täysi, kuten johteilla, mutta ero seuraavalle energiatasolle eli johtavuusvyölle paljon pienempi kuin eristeillä. Kun puolijohdeen läpi aiheutuu sähkökenttä, saavat elektronit tarpeeksi energiaa siirtyäkseen johtavuusvyölle, jolloin ne voivat toimia varauksenkuljettajina. [11]

Puolijohdeita on kahta tyyppiä: p ja n. P-tyypissä varauksenkuljettajina toimivat positiiviset aukot, eli elektronittomat paikat. N-tyypissä puolestaan elektronit. [11]

Puolijohdeiden sähkönjohtavuutta voidaan muuttaa douppauksella eli lisäämällä epäpuhtausatomeja. Epäpuhtausatomilla voi olla ylimääräisiä elektroneja tai aukkoja, jolloin positiivisten tai negatiivisten aukkojen ylimäärä kasvaa. Kuvassa 3.1 on esitetty puhtaan, n-doupatun p-doupatun piin rakenteet.



Kuva 3.1: a) Puhdas pii b) Fosforiatomilla n-doupattu pii c) Booriatomilla p-doupattu pii [12]

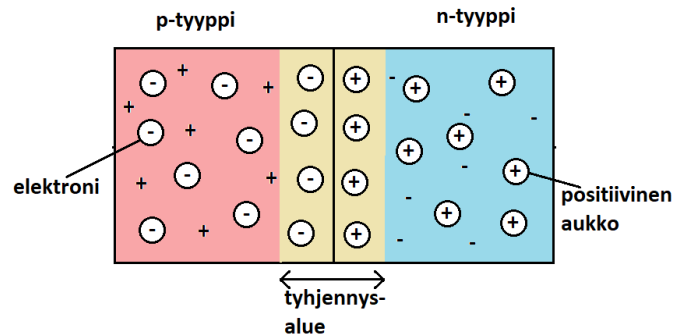
3.2 Diodi

Diodi on elektroniikkakomponentti, jonka läpi virta voi kulkea vain yhteen suuntaan. Diodi syntyy kun p- ja n- tyyppiset puolijohteet yhdistetään. Rajalla erimerkkisten aukkojen välille syntyy sähköinen voima. Kun positiiviset ja negatiiviset aukot kohtaavat, ne rekombinoituvat ja katoavat. Rajalle syntyy tyhjennysalue, jossa on positiivisia ja varautuneita ioneja. Näiden välille muodostuu sähkökenttä, joka estää aukkojen kulkeutumisen puolelta toiselle. [11]

Diodi on esitetty kuvassa 3.2. Jos diodiin kytketään jännite, muodostuu puolien välille sähkökenttä. Virta diodissa voi kulkea vain p-alueelta n-alueelle, jolloin se on kytketty päästösuuntaan. Jos Korkea jännite kytketään n-alueelle, pyrkivät aukot pois päin toisistaan, jolloin diodi on kytketty estosuuntaan. Diodia käytetään elektroniikassa virran suuntaamiseen. [11]

3.3 MOSFETin toiminta

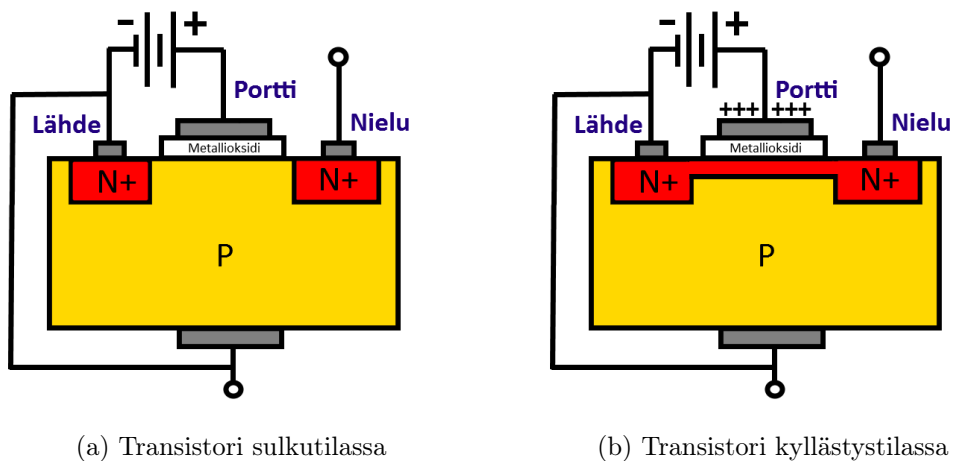
MOSFET on kenttätransistori, jossa hilaelektrodi on eristetty kanavasta metallioksidilla. Kanava voi olla ilman kytkettyä jännitettä auki tai kiinni, riippuen onko transistori sulkutyyppi vai avaustyyppi. Sulkutyyppi toimii ilman jännitettä avoimena kytkimenä ja avaustyyppi suljettuna kytkimenä. Käsitellään tässä yleisemmän eli



Kuva 3.2: Diodi, johon ei ole kytketty jännitettä.

sulkutyypin toimintaa. [11]

Kuvassa 3.3 on esitelty MOSFETin rakenne. Transistorissa on lähde ja nielu ovat vahvasti dopattuja samantyyppisiä puolijohdteita. Niitä erottaa suuri vastakaistyypinen puolijohdesubstraatti. n- ja p- dopattujen puolijohdehilojen välille syntyy tyhjennysalue kuten diodissa. Riippuen transistorin tyypistä, lähde ja nielu voivat olla p- tai n- tyyppisiä, ja substraatti on näille vastakaistyypinen. Käsitellään tässä n-kanavaista transistoria. [11]



(a) Transistori sulkutilassa

(b) Transistori kyllästystilassa

Kuva 3.3: MOSFET sulku- ja kyllästystilassa

Transistorista lähtee kolme johdinta. Yksi nielusta, lähteestä ja metalliportista, joka on eristetty substraatista metallioksidilla. Transistori, jossa ei kulje virtaa, toimii piirissä avoimena kytkimenä ja sen tilaa kutsutaan sulkutilaksi. Kun

porttiin aiheutetaan jännite, muodostuu substraatin läpi magneettikenttä. Magneettikenttä aiheuttaa p-tyyppisen substraatin elektronien siirtymisen porttia kohti, jolloin positiiviset aukot sen lähellä täyttyvät. Ylimääräisten elektronien määrä tällä kanava-alueella riippuu kytketyn jännitteen suuruudesta. Elektronit pystyvät kanava-alueella kulkemaan lähteeltä nielulle n-tyyppistä kanavaa pitkin. Mitä enemmän elektroneja alueelle kulkeutuu, sitä leveämpi kanavasta tulee. Substraatti on siis muuttunut kanavasta sähkönjohtavaksi. Suljettuna kytkimenä piirissä toimivan transistorin tilaa kutsutaan kyllästystilaksi. Transistori sulku- ja kyllästystilassa on esitetty kuvassa 3.3. [11]

3.4 MOSFETin heikkoudet

Nykyisissä MOSFETEissa käytetään ylivoimaisesti eniten piitä hilamateriaalina. Pii-MOSFETilla on useita heikkouksia, jotka asettavat rajoitteita niiden käytölle ja kehitykselle. Mooren lain mukainen kehitysennuste, jossa mikropiirien transistorien määrä kaksinkertaistuu joka toinen vuosi, ei pysty jatkumaan Pii-MOSFETin rajoitusten takia. Pii-MOSFETia rajoittavat nopeus, piirin suunnittelun monimutkaisuus, monimutkaisen piirin kustannukset ja energiankulutus. [13]

Mikropiirien nopeutta rajoittavat ongelmat MOSFETin skaalaamisessa pienemmäksi. MOSFETin koko vaikuttaa olennaisesti sen nopeuteen mutta myös tuotantokustannuksiin ja tehohäviöihin. Pienemmät transistorit ovat nopeampia, koska signaalin matka on lyhyempi. Skaalausongelmassa on kyse MOSFETilla nanometri-skaalassa ilmenevistä ongelmista. [14]

Mikropiirien suunnittelu monimutkaistuu nopeasti piirin koon pienentyessä ja transistorimäärän kasvaessa. Monimutkaisuus kasvattaa suunnattomasti uusien piirien suunnittelun monimutkaisuutta, mikä aiheuttaa entisestään kasvavia haasteita niiden kehitykselle. [13]

Piirien kehityksen kustannukset kasvavat monimutkaisuuden kasvaessa ekspo-

mentiaalisesti. Elektroniikassa käytettävien transistorien siirtyminen MOSFETia skaalautumiskykyisimpiin transistoreihin, säilyttäisi suunnittelun ja siten myös kehityskustannukset kohtuullisina. Myös erityyppisten transistorien tuotantokustannukset nanoskaalalla vaihtelevat. Edullisesti valmistettavien transistorien käyttöön siirtyminen laskisi niiden tuotantokustannuksia. [13]

Energiankulutus kasvaa tiheissä piireissä nopeasti ja aiheuttaa ongelmia niiden toimintaan. Vaikka pienemmät transistorit toimivat pienemmällä teholla, niiden tiheys piirissä kasvattaa lämmöntuotantoa. Transistorimateriaalien resistanssi korreloi niiden lämpötilan kanssa, mikä lisää energiankulutusta. Korkea lämpötila voi aiheuttaa piiriin häiriöitä, kun MOSFETit vaikuttavat toisiinsa. Skaalatessa piirejä pienemmiksi, niiden vuotovirta kasvaa eksponentiaalisesti, mikä kasvattaa energiankulutusta. Vuotovirta johtuu esimerkiksi ohentuneen eristeen huonosta eristyskyvystä ja tunneloitumisesta transistorien välillä ja eristeen läpi. [13], [14]

Pii-MOSFETin toiminta-alueita eri jännitteillä on rajoitettu. Hajotusjännite tarkoittaa korkeinta jännitettä, jolla transistori toimii ilman, että sen vuotovirta kasvaa eksponentiaalisesti. MOSFETilla hajotusjännite on verrattain matala, mikä asettaa rajoitteita piin käytölle korkea-jännitteisissä käyttökohteissa, kuten moottorikulkuneuvoissa, teollisuudessa ja sähkönsiirrossa. Myös matalilla jännitteillä toimiville transistoreille on tarvetta, esimerkiksi tietokoneen muistissa. [15]

4 Tulevaisuuden transistorit

MOSFETin skaalausongelmaan ja sähkönkulutukseen on etsitty ratkaisua tutkivalta uusista kanavatransistorimateriaaleista ja -mekaniikoista.

4.1 Transistorimateriaalit

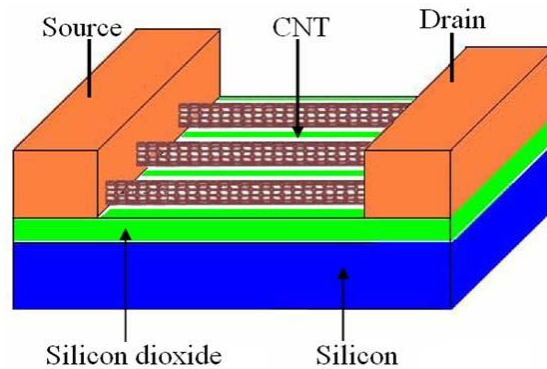
Laajakaistaisilla puolijohteilla energiatasojen väli on suurempi kuin piillä. Niillä valmistetut transistorit toimivat korkeammilla lämpötiloilla, taajuuksilla ja jännitteillä, mutta eivät ratkaise skaalausongelmaa. Lupaavia laajakaistaisia materiaaleja ovat piikarbidi ja galliumnitridi. [15]

Piikarbidilla (SiC) on paljon suurempi energia-aukko kuin piillä. Se toimii piitä selvästi korkeammassa sähkökentässä ja jännitteissä rikkoutumatta. Piikarbidilla on piihin verrattuna kolminkertainen lämmönjohtavuus, mikä tarkoittaa tehokkaampaa jäähtymistä ja matalampaa resistanssia. Piikarbidi on selvästi kalliimpaa kuin pii. [16]

Galliumnitridin (GaN) energia-aukko on hieman suurempi kuin piikarbidilla. Se toimii hieman piikarbidia korkeammassa sähkökentässä ja jännitteissä. Sen korkea elektroniliikkuvuus mahdollistaa suuremman kytkentänopeuden. Korkea toiminta-aajuus mahdollistaa pienempien kelojen ja muuntajien käytön piirissä, mikä pienentää laitteiden kokoa ja hintaa. Galliumnitridin lämmönjohtavuus on huonompi kuin piikarbidilla, mikä heikentää sen soveltuvuutta suurille tehoille ja lämpötiloille. Galliumnitridi on hyvin kallista verrattuna piihin ja piikarbidisiin. [17]

Hiilen allotrooppisia muotoja grafeenia ja hiilinanoputkea voidaan käyttää kanavatransistorien kanavanamateriaalina. Piikarbidin ja galliumnitridin tapaan niiden hyödyt johtuvat energia-aukosta ja varauksenkuljettajien paremmasta liikkuvuudesta. Lupaavampana materiaalina pidetään hiilinanoputkea, koska se on ominaisuuksiltaan grafeenia parempi kanavana.

CNTFETin eli hiilinanoputki-kanavatransistorin rakenne on esitetty kuvassa 4.1. CNTFETin hyötyjä ovat nopeus ja pienemmät vuotovirrat. CNTFETia on kehitetty digitaaliseen elektroniikkaan ja herkkyytensä ansiosta erilaisiin antureihin. Toisin kuin tavallista MOSFETia, CNTFETia voidaan käyttää hyvin tiiviisti piireissä, mikä lisää kiinnostusta sen käyttöön mikroprosessoreissa.



Kuva 4.1: CNTFETin rakenne [18]

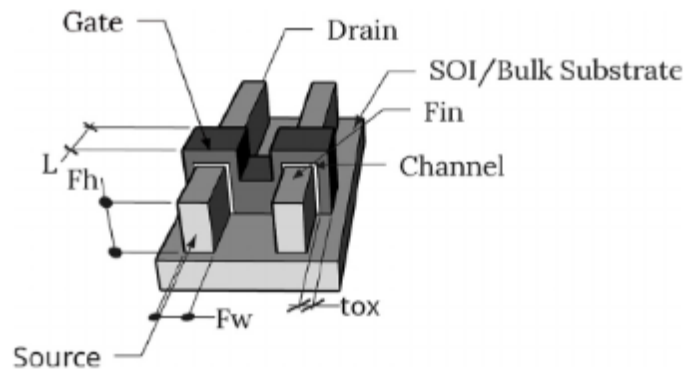
4.2 Transistorimekaniikat

Moniporttisuus ja geometrisen rakenteen muuttaminen voivat tehdä MOSFETista tehokkaamman ja paremmin toimivan nanomittaskaalalla.

Moniporttisuus tarkoittaa, että yhdessä transistorissa on useampi portti, joita ohjaa yksi tai useampi porttielektrodi. Erilaisella geometrisella rakenteella voidaan puolestaan muuttaa transistorin sisäisiä ominaisuuksia. [19]

FinFET on yleisin moniporttinen transistori. Se toimii kuten MOSFET, mutta

sen nielu ja lähde ovat evämäisen muotoisia ja ne tulevat ulos piisubstraatin pinnalta. Lähteen ja nielun välissä on kanava, jota peittää portti kolmelta sivulta. FinFETin rakenne on esitetty kuvassa 4.2. [19]



Kuva 4.2: Kaksiporttisen finFETin rakenne [19]

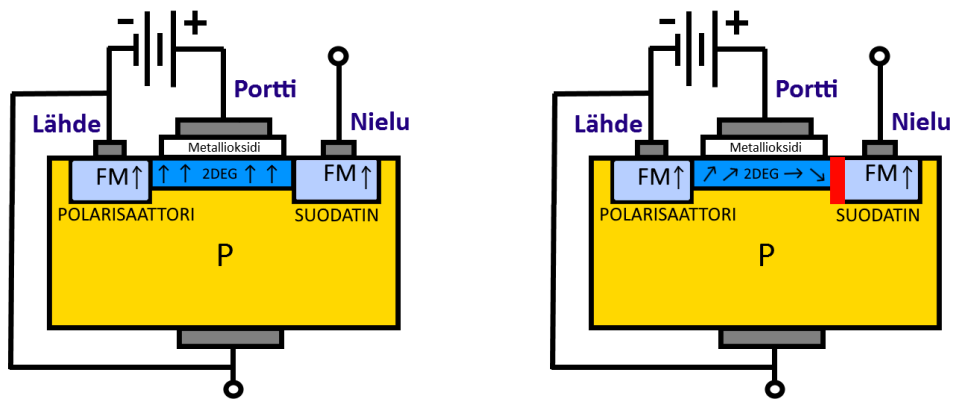
FinFETin hyödyt johtuvat sekä moniporttisuudesta että evämäisestä rakenteesta. Se on nopeampi, tehokkaampi ja soveltuu pienemmälle mittaskaalalle. FinFETeja hyödynnetään jo prosessoreissa. [19]

Kvanttimekaniikan ilmiöitä, kuten tunneloitumista ja elektronin spiniä, voidaan hyödyntää transistoreissa. Spin on alkeishiukkasen kvanttimekaaninen ominaisuus, magneettinen momentti. Spinin avulla voidaan kuljettaa tai tallettaa informaatiota elektroniin. Tunneloituminen tarkoittaa ilmiötä, jossa elektroni voi läpäistä potentiaalivallin, vaikka sillä ei klassisesti olisi siihen tarpeeksi energiaa. Tämä johtuu siitä, että elektronilla on hiukkasluonteen lisäksi aaltoluonne, minkä vuoksi elektroni voi pienellä todennäköisyydellä läpäistä vallin. [20]

Spin-FET eli spin-kanavatransistori on transistori, joka hyödyntää elektronin spiniä. Sähkövirran elektronien spinit voidaan muuttaa polarisoimalla ne ferromagneettisessa aineessa yhdensuuntaiseksi. Elektronin spinin polarisaatio toimii siis informaationa. [21]

Spin-kanavatransistorin rakenne on saman kaltainen kuin tavallisen MOSFETin.

Spin-MOSFET on esitetty kuvassa 4.3. Sen nielu ja lähde ovat ferromagneettista materiaalia. Sulkutilassa porttiin ei ole kytketty jännitettä. Kun lähteeseen kytketään virta, sen ferromagneettinen aine toimii polarisaattorina ja polarisoi tulevan virran. Polarisoitunut virta kulkee kaksiulotteisesta elektronikaasusta valmistetun kanavan läpi nielulle. Nielu toimii suodattimena ja päästää lävitsensä vain täysin polarisoituneet elektronit. Jos porttiin aiheutetaan jännite, puolijohdehilan yli muodostuu magneettikenttä. Magneettikenttä muuttaa virran elektronien polarisaatiota Rashba-vuorovaikutuksen myötä, eikä nielu ota niitä enää vastaan. Kuvassa 4.3 elektronien polarisaatiota kuvaavat nuolet. Transistori on siis normaalisti tyhjennystilassa ja jännitteen kytkeminen sulkee sen. [22]



(a) Spin-MOSFET sulkutilassa

(b) spin-MOSFET kyllästystilassa

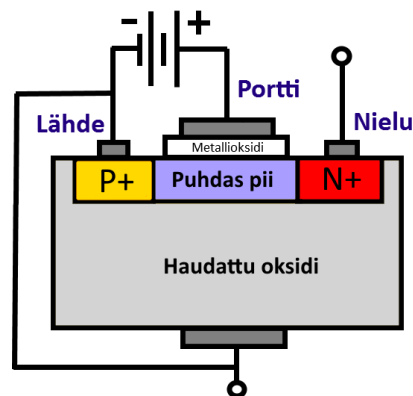
Kuva 4.3: spin-MOSFET sulku- ja kyllästystilassa

Spin-kanavatransistoreista valmistettujen komponenttien tehonkulutus on jopa 30–50 % alhaisempi kuin MOSFETeistä valmistetuilla komponenteilla johtuen erityisesti niiden alhaisista kytkentähäviöistä. Ne toimivat korkeilla taajuuksilla ja matalatehoisissa sovelluksissa. [21]

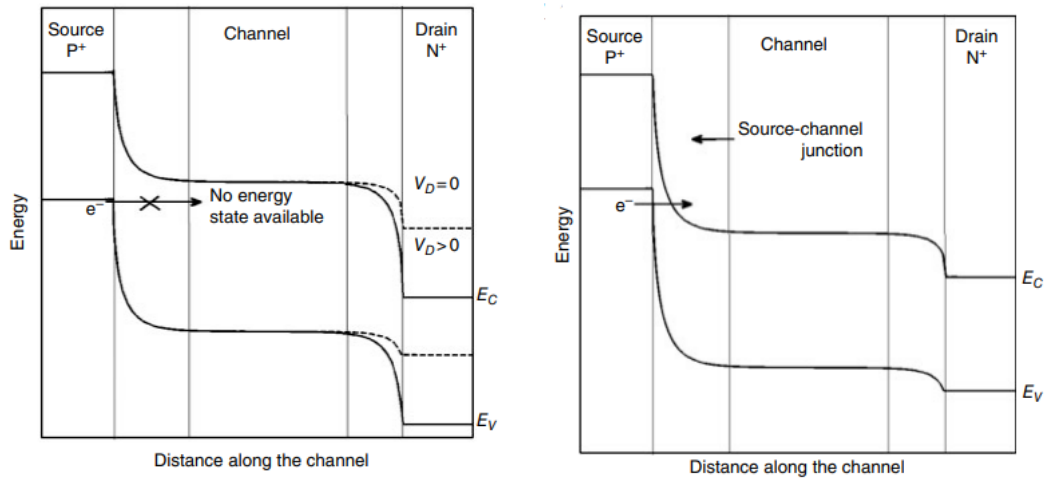
TFET eli tunneloitumis-kanavatransistorissa virta syntyy elektronien tunneloitumisen avulla. Elektronin tunneloituminen tapahtuu TFETissä sen energiavöiden välillä. Elektronit, jotka ovat lähteellä valenssivyöllä, voivat tunneloitua johtavuus-

vyölle, kun transistori on tyhjennystilassa. [23]

N-kanavallisen TFETin rakenne on esitetty kuvassa 4.4. Toisin kuin MOSFETissa, sen lähde ja nielu on doupattu vastakkaisesti ja niiden välillä on puhdasta piitä. Materiaalien valinta johtuu niiden elektronivöiden energiaeroista. P-doupatulla piillä vöiden energiatasot ovat korkeimmat, N-doupatulla piillä pienimmät ja puhtaalla piillä energiatasot ovat näiden välissä. TFETin valenssi- ja johtavuusvöiden energiaerot on esitetty kuvassa 4.5. TFETin ollessa pois päältä lähteellä olevilla valenssielektroneilla on liian vähän energiaa tunneloitua kseen piin johtavuusvyölle. Kun transistoriin kytketään jännite, vöiden väliset energiaerot pienenevät. Todennäköisyys elektronin tunneloitumiselle piin johtavuusvyölle, kasvaa. Korkeammalla jännitteellä tunneloitumista tapahtuu enemmän eli transistorin virta on suurempi. [23]



Kuva 4.4: TFET-transistorin rakenne



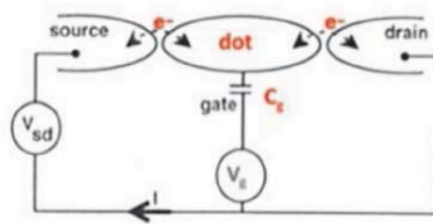
(a) Sulkutilassa eli avoimena kytkimenä (b) Kyllästystilassa eli suljettuna kytkimenä

Kuva 4.5: TFETin lähteen, kanavan ja nielun valenssi- ja johtavuusvöiden energia. Johtavuusvyötä kuvaa suurempienerginen kuvaaja. [23]

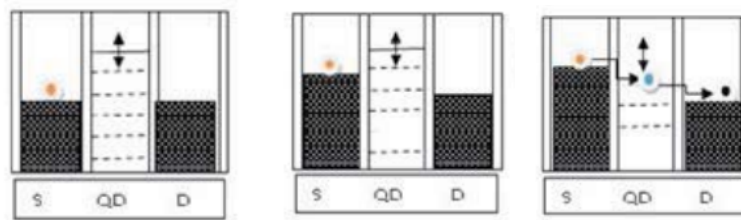
TFET mahdollistaa pienempien transistorien valmistuksen. TFETin vuotovirta on pieni ja se toimii hyvin alhaisilla virroilla ja jännitteillä eli sopisi matalajännitteisiin sovelluksiin. [24]

SET eli yksielektronitransistori hyödyntää myös elektronin tunnelloitumista. SETissa kanava on korvattu kvanttipisteellä. Kvanttipiste tarkoittaa materiaaliosta, jonka koko on muutaman nanometrin. Kvanttipiste käyttäytyy kuin atomi. [25]

SETin rakenne muistuttaa MOSFETia. Kvanttipisteellä korvattu kanava on erotettu lähteestä ja nielusta ohuilla eristeillä. Sen toimintaperiaate on samantyyppinen kuin TFETillä. Ilman porttiin kytkettyä jännitettä transistori on sulkutilassa, koska kvanttipisteen vapaat energiavyöt ovat liian suurienergisiiä tunnelloitumiseen. Jos porttiin aiheutetaan sopiva jännite ja virta, kvanttipisteen matalaenergisiä energiatasoa vapautuu. SETin lähteen, kvanttipisteen ja nielun suhteelliset energiatasot eri tiloissa on esitetty kuvassa 4.7. [25]



Kuva 4.6: SET-transistorin rakenne



(a) Ilman virtaa ja jännitettä

(b) Virralla

(c) Virralla ja jännitteellä

Kuva 4.7: Kuvaus SETin lähteen, kvanttipisteen ja nielun energiatiloista eri vaiheissa [25]

Vaikka SET muistuttaa TFETia, ne eroavat ominaisuuksiltaan. Koska sähköjohtavuus perustuu SETissa yksittäisen elektronin tunneloitumiseen, se on TFETia nopeampi ja vähemmän tehohäviöitä ja lämpöä tuottava. SET sopii herkkyytensä ansiosta erilaisiin antureihin. [25]

5 Yhteenveto

Työssä selvitettiin MOSFETin toimintaa ja esiteltiin piille vaihtoehtoisia materiaaleja ja kanavatransistorien eri tekniikoita.

MOSFETin toiminta perustuu puolijohteen käyttämiseen kanavana, jonka sähkönjohtokyky muuttuu sen läpäisevän sähkökentän mukaan. Sähkökenttä saa portin lähellä olevat varausaukot täyttymään, jolloin substraattiin muodostuu sähköä johtava kanava. Piin käyttö puolijohdemateriaalina ja MOSFETin rakenne rajoittavat sen tehokkuutta ja toimivuutta eri sovelluksissa.

Piin korvaaminen toisella puolijohteella tai hiilinanoputkella laajentaisi MOSFETin käyttöaluetta. Ne eivät kuitenkaan poista skaalausongelmaa, eivätkä siten mahdollista MOSFETin kehittämistä tehokkaammaksi.

Kanavatransistorien Vaihtoehtoisia mekaniikkoja on tutkittu viime vuosisadan lopulta lähtien. Mistään vaihtoehtoisesta transistorista ei kuitenkaan ole niin pitkälle kehitettyä versiota, että sitä voisi pitää MOSFETin korvaajana. Elektroniikan tehokkuuden kehityksen hidastuminen tulee lisäämään paineita muiden transistorityyppien kehitykselle. Muuttamalla ja kehittämällä transistorin geometrinen rakennetta voidaan tehdä huomattavia parannuksia tehokkuuteen. FinFETin kehitys on jo niin pitkällä, että sitä hyödynnetään jo olemassa olevissa prosessoreissa. Kvanttimekaniikan hyödyntäminen transistorin toimintamekaniikassa tarjoaisi useita eri vaihtoehtoja kehityksen suunnalle. Spin-FETin, TFETin ja SETin kehittäminen tulee viemään aikaa, ennen kuin niitä voidaan hyödyntää laajasti.

Tässä tutkielmassa esiteltyt vaihtoehtoiset materiaalit valittiin sen perusteella, että niiden tutkimus ja kehitys on edennyt pitkälle. Kanavatransistorien vaihtoehtoiset tekniikat valittiin sen perusteella, että niiden käyttökohteet ovat tietokoneissa ja sensoreissa, ja että niiden tutkiminen ja kehitys on ajankohtaista. Tutkielmassa ei esitelty transistorivaihtoehtoja, jotka eivät ole rakenteeltaan kanavatransistoreita.

Tutkimusta voisi jatkaa laajentamalla tutkimusaluetta kenttätransistorien ulkopuolelle tai ottamalla mukaan tutkimukseen vähemmän tutkittuja transistorimekaniikkoja. Muita vaihtoehtoja MOSFETille ovat optiset transistorit, bioanturina toimiva bio-FET tai kvanttietokoneet, joissa ei käytetä transistoreita, vaan kubitteja.

Lähdeluettelo

- [1] *13 Sextillion & Counting: The Long & Winding Road to the Most Frequently Manufactured Human Artifact in History*, en, Section: Remarkable People, huhtikuu 2018. url: <https://computerhistory.org/blog/13-sextillion-counting-the-long-winding-road-to-the-most-frequently-manufactured-human-artifact-in-history/> (viitattu 07. 11. 2023).
- [2] *The Future of the Transistor Is Our Future - IEEE Spectrum*, en. url: <https://spectrum.ieee.org/the-future-of-transistors> (viitattu 07. 11. 2023).
- [3] *Chapter 6: The History of Computers*. url: http://www.assis.pro.br/public_html/davereed/06-History.html (viitattu 05. 10. 2023).
- [4] R. Spekking, *English: Delta Electronics DPS-350FB A - board 1 - OEG SDT-SS-112M - case removed*, elokuu 2021. url: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta_Electronics_DPS-350FB_A_-_board_1_-_OEG_SDT-SS-112M_-_case_removed-3045.jpg (viitattu 10. 10. 2023).
- [5] N. Ames, *803 Vacuum Tube (size comparison)*, marraskuu 2009. url: <https://www.flickr.com/photos/nickames/4081648117/> (viitattu 10. 10. 2023).
- [6] N. m.-r. a. p. C. assumed, *Cyril BUTTAY -*, huhtikuu 2006. url: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:D2PAK.JPG> (viitattu 10. 10. 2023).
- [7] K. Martin, *Zuse Z3 Computer 1940*, marraskuu 2007. url: <https://www.flickr.com/photos/9479603@N02/1814569067/> (viitattu 27. 01. 2024).

- [8] Andrew and Annemarie, *A Colossus Mark 2 Computer*, lokakuu 2013. url: https://www.flickr.com/photos/andrew_annemarie/10134919003/ (viitattu 27.01.2024).
- [9] U. author, *This image of the System/360 Model 91 was taken by NASA sometime in the late 60s*. Wikimedia Snapshot: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:360-91-panel.jpg>, 1960. url: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:360-91-panel.jpg> (viitattu 27.01.2024).
- [10] *Singularity is Near -SIN Graph - Random Access Memory*. url: <https://www.singularity.com/charts/page75.html> (viitattu 11.10.2023).
- [11] J. Aaltonen, S. Kousa ja J. Stor-Pellinen, *Elektroniikan perusteet*, fin, 4. korj. p. Helsinki: Limes, 2004, ISBN: 978-951-745-206-9.
- [12] J. Röhr, "Electron Transport in Solution Processed Antimony Sulphide Thin Films made from a Xanthate Precursor", tohtorinväitöskirja, syyskuu 2014. DOI: 10.13140/RG.2.2.29530.39366.
- [13] Humaira ja M. Asghar, "Limitation of Silicon Based Computation and Future Prospects", maaliskuu 2010, s. 559–561. DOI: 10.1109/ICCSN.2010.81.
- [14] R. K. Ratnesh, A. Goel, G. Kaushik et al., "Advancement and challenges in MOSFET scaling", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 134, s. 106002, 2021, ISSN: 1369-8001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106002>.
- [15] S. Singh, T. Chaudhary ja G. Khanna, "Recent Advancements in Wide Band Semiconductors (SiC and GaN) Technology for Future Devices", en, *Silicon*, vol. 14, nro 11, s. 5793–5800, heinäkuu 2022, ISSN: 1876-990X, 1876-9918. DOI: 10.1007/s12633-021-01362-3. (viitattu 22.09.2023).

- [16] E. O. Prado, P. C. Bolsi, H. C. Sartori ja J. R. Pinheiro, ”An Overview about Si, Superjunction, SiC and GaN Power MOSFET Technologies in Power Electronics Applications”, en, *Energies*, vol. 15, nro 14, s. 5244, heinäkuu 2022, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15145244. (viitattu 22.09.2023).
- [17] S. Dimitrijević, J. Han, D. Haasmann, H. Amini Moghadam ja A. Aminbeidokhti, ”Power-switching applications beyond silicon: Status and future prospects of SiC and GaN devices”, vol. 40, toukokuu 2014, s. 43–46, ISBN: 978-1-4799-5296-0. DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842083.
- [18] M. Jaiswal ja A. Singh, *Design and Analysis of CNTFET-Based SRAM*, heinäkuu 2015.
- [19] S. U. Haq ja V. Sharma, ”Review of the Nanoscale FinFET Device for the Applications in Nano-regime”, *Current Nanoscience*, vol. 19, joulukuu 2022. DOI: 10.2174/1573413719666221206122301.
- [20] D. J. Griffiths ja D. F. Schroeter, *Introduction to quantum mechanics*, Third edition. Cambridge ; New York, NY: Cambridge University Press, 2018, ISBN: 978-1-107-18963-8.
- [21] G. Wang, Z. Wang, J.-O. Klein ja W. Zhao, ”Modeling for Spin-FET and Design of Spin-FET-Based Logic Gates”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, nro 11, s. 1–6, 2017. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2704881.
- [22] G. F. A. Malik, M. Ahmad, F. A. Khanday ja N. Parveen, ”Simulation of Triple Gate Spin Field-Effect Transistor and its Applications to Digital Logic”, 2020, s. 440–443. DOI: 10.1109/VLSIDCS47293.2020.9179894.
- [23] M. J. Kumar, R. Vishnoi ja P. Pandey, *Tunnel Field-Effect Transistors (TFET): Modelling and Simulation*. lokakuu 2016, s. 1–195, ISBN: 9781119246299. DOI: 10.1002/9781119246312.

-
- [24] S. Turkane ja A. Kureshi, "Review of Tunnel Field Effect Transistor (TFET)", *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, s. 4922–4929, toukokuu 2016.
- [25] M. Z. Ahsan, "SINGLE ELECTRON TRANSISTOR (SET): OPERATION AND APPLICATION PERSPECTIVES", en, joulukuu 2018, Accepted: 2020-06-10T05:05:14Z, ISSN: 2224-2007. url: <http://dspace.mist.ac.bd:8080/xmlui/handle/123456789/507> (viitattu 10.11.2023).