

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Аналогты электронды схемалар

«Өндірістік электроника және басқару жүйелері», «Радиотехника,
электроника және телекоммуникациялар» мамандықтары бойынша білім
алушы студенттерге арналған

Алматы

5 Дәріс

Тақырыбы: Өрістік транзисторлар

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Өрістік транзисторлардың құрылымы, жұмыс принциптері мен ерекшеліктерін түсіндіру, олардың әртүрлі электронды құрылғылар мен жүйелердегі рөлін анықтау. Сонымен қатар, MOSFET, JFET, MESFET транзисторларының жұмыс режимдері мен қолдану салаларына назар аудара отырып, олардың қазіргі заманғы электрондық құрылғыларда тиімді пайдалану мүмкіндіктерін көрсету.

Міндеттері:

- Өрістік транзисторлардың негізгі құрылымы мен жұмыс принципін түсіндіру.
- MOSFET, JFET және MESFET транзисторларының ерекшеліктерін сипаттау.
- Өрістік транзисторлардың жұмыс режимдерін талдау (қаныққан, кесілген, сызықты).
- Транзисторларды жоғары жиілікті және төмен жиілікті қолданбаларда пайдалану мүмкіндіктерін көрсету.
- Жартылай өткізгіштік технологиялардың даму бағыттары мен CMOS, GaN, SiC технологияларын қысқаша түсіндіру.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- FET (Field-Effect Transistor) – өрістік транзистор.
- Gate – қақпа, ток ағымын басқаратын кіріс терминалы.
- Source – ток кіретін терминал.
- Drain – ток шығатын терминал.
- JFET, MOSFET, MESFET – өрістік транзисторлардың түрлері.
- Cut-off, Saturation, Linear режимдері – транзистордың жұмыс режимдері.
- CMOS технологиясы – энергияны үнемдейтін интегралды схемалар технологиясы.

Дәріс жоспары

Кіріспе

1. Өрістік транзисторлардың негізгі принциптері
2. Өрістік транзисторлардың түрлері
3. MOSFET құрылымы және жұмыс принципі
4. MOSFET транзисторларының ерекшеліктері
5. Жұмыс режимдері
6. Жоғары жиілікті және төмен жиілікті қолданбалар
7. Жартылай өткізгіштік технологиялардың дамуы

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

Қорытынды

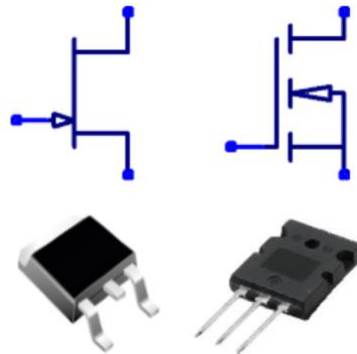
Әдебиеттер тізімі

Кіріспе

Өрістік транзисторлар (Field-Effect Transistors, FET) - бұл қазіргі заманғы электронды құрылғылардың негізі болып табылатын жартылай өткізгіш компоненттер. Олар арнайы құрылым мен жұмыс істеу принципі арқылы токтың өтуін басқару мүмкіндігін береді. FET транзисторлары көбінесе күшейткіштер мен қосқыштар ретінде қолданылады.

1. Өрістік транзисторлардың негізгі принциптері

Өрістік транзисторлар (FET) — бұл электр өрісін пайдалана отырып, жартылай өткізгіш материалының өткізгіштігін өзгерту арқылы токтың өтуін басқаруға негізделген құрылғылар. Бұл принцип қазіргі заманғы электроникада ең маңызды компоненттердің бірі болып табылады, өйткені олар жоғары кіріс кедергісі мен аз қуат тұтынуымен ерекшеленеді. Өрістік транзисторлардың жұмыс принципін толық түсіну үшін бірнеше негізгі аспектілерді қарастыру қажет.



Өрістік транзисторларда негізгі жұмыс принципі — электр өрісі. Өріс деп біз электр зарядтарының әсерінен туындайтын күштерді айтамыз. Өріс транзисторларында электр өрісі жартылай өткізгіштің өткізгіштігін өзгертеді. Өткізгіштік жартылай өткізгіштің негізгі қасиеттерінің бірі болып табылады, ол материалдың ішіндегі заряд тасымалдаушылар (электрондар немесе саңылаулар) санына байланысты болады.

❖ Жартылай өткізгіштің өткізгіштігіне әсер ету үшін, өрістік транзисторда арнайы гейт (немесе басқарушы электрод) қолданылады. Гейт пен жартылай өткізгіш арасындағы кернеу электр өрісін қалыптастырады.

❖ Егер гейтке берілетін кернеу өзгерсе, ол жартылай өткізгіштің өткізгіштігін өзгертеді. Бұл өз кезегінде өткізгіштік каналда токтың өтуін басқаратын негізгі фактор болып табылады.

Өрістік транзисторлар негізінен үш негізгі бөліктен тұрады:

- ❖ Гейт (Gate) — бұл басқарушы электрод, ол электр өрісін жасайды.
- ❖ Сток (Drain) — токтың шығатын нүктесі.
- ❖ Исток (Source) — токтың кіретін нүктесі.

Бұл үш бөліктің арасындағы өзара әрекеттесу арқылы токтың өтуін реттейді. Гейтке кернеу берілгенде, жартылай өткізгіштің өткізгіштігі өзгеріп, токтың өтуі басталады.

Өрістік транзистордың жұмысының негізгі ерекшелігі — токтың өтуін гейтке берілетін кернеумен басқару. Гейтке кернеу берілген кезде, ол жартылай өткізгіштің өткізгіштігін өзгертеді, ал бұл өз кезегінде токтың өтуін реттейді.

❖ Қосқыш режимі: Гейтке жеткілікті оң кернеу берілгенде, өткізгіштіктің артуы нәтижесінде ток дренаждан көзге қарай өтеді.

❖ Өткізбейтін режимі: Егер гейтке теріс немесе нөлдік кернеу берілсе, өткізгіштік канал жабылады, және ток өтпейді.

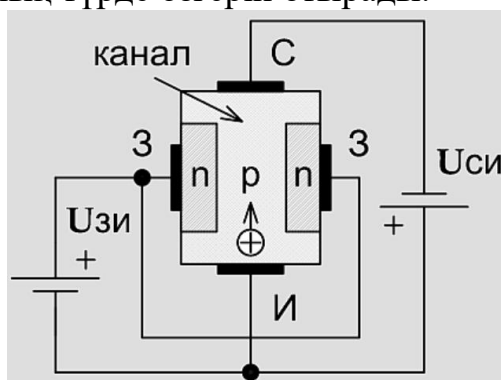
Бұл кернеу арқылы өрістік транзисторлардың қосылып-жабылу (қосқыштық) әрекетін қамтамасыз етеді, әрі олар қуатты басқару мен күшейту процестерінде кеңінен қолданылады.

Өрістік транзистордың негізгі жұмыс принципінде каналдағы токтың өтуі маңызды орын алады. Канал жартылай өткізгіштің екі нүктесін (source және drain) байланыстырады, бірақ оның өткізгіштігі гейтке берілген кернеуге байланысты болады.

❖ Токтың өтуі: Егер гейтке қажетті кернеу берілсе, онда канал қалыптасып, ток өтіп, құрылғы жұмыс істейді.

❖ Каналдың жабылуы: Гейтке теріс немесе тым аз кернеу берілсе, жартылай өткізгіштің өткізгіштігі төмендейді, және токтың өтуі шектеледі. Бұл жағдайды токтың өтуін тоқтату немесе толық өшірілу деп атайды.

Токтың өтуі жартылай өткізгіштің қасиеттеріне (мысалы, оның өткізгіштігі) тікелей байланысты, және бұл қасиет гейтке кернеу берілуіне байланысты динамикалық түрде өзгеріп отырады.



Өрістік транзисторлардың күшейтушілік қасиеті, әсіресе MOSFET сияқты түрлерінде өте жоғары. Гейтке кернеу берілгенде, оның әсерінен өткізгіштік канал қалыптасып, онда өтетін ток күшейеді. Бұл жағдай жоғары кіріс кедергісі мен төмен қуат тұтынуымен ерекшеленетін күшейткіштерді құруға мүмкіндік береді. Қосымша мүмкіндіктердің бірі — өте төмен қуат тұтыну мен жоғары жиіліктегі тұрақтылықты қамтамасыз ету.

2. Өрістік транзисторлардың түрлері

Өрістік транзисторлар (FET) түрлі жұмыс принциптері мен құрылымдарға негізделген бірнеше түрге бөлінеді. Әрбір түрінің өзіндік ерекшеліктері мен қолдану салалары бар. Бұл бөлімде ең танымал үш түрі — MOSFET, JFET, және MESFET туралы толық ақпарат берілген.

MOSFET (металл-оксид-жартылай өткізгіш өрістік транзисторы) қазіргі замандағы ең кең тараған өрістік транзистор түрі болып табылады. Бұл құрылғының жұмыс принципі жоғары кіріс кедергісін және төмен шығыс қуатын қамтамасыз етуімен сипатталады.

❖ Құрылымы: MOSFET транзисторының негізгі құрылымында металл (гейт), оксид қабаты (көбінесе силикон оксиді) және жартылай өткізгіш (әдетте кремний) қабаты болады. Гейт оксид қабаты арқылы жартылай өткізгіш материалмен байланыстырылады.

❖ Жұмыс принципі: MOSFET-те гейтке кернеу берілуі арқылы өткізгіштік каналдың пайда болуы немесе жабылуы бақыланады. Гейттің кернеуіне байланысты жартылай өткізгіштің өткізгіштігі өзгеріп, токтың өтуі басқарылады.

❖ Негізгі артықшылықтары:

- Жоғары кіріс кедергісі: Гейт пен жартылай өткізгіш арасында оқшауланған оксид қабаты болғандықтан, токтың өтпейтіндігіне байланысты кіріс кедергісі өте жоғары болады. Бұл өз кезегінде, MOSFET-ті басқа транзистор түрлеріне қарағанда тиімдірек етеді.

- Төмен қуат тұтыну: Гейтке ток берілмейді, тек кернеу беріледі, сондықтан оның қуат тұтынуы өте аз.

- Жоғары жиілік: Бұл транзисторлар жоғары жиілікті сигналдарды өңдеуде де тиімді жұмыс істейді.

❖ Қолдану салалары: MOSFET транзисторлары көптеген цифрлық схемаларда, күшейткіштерде, күштік құрылғыларда және интеграцияланған схемаларда қолданылады. Олар микроэлектроника мен компьютер техникасында кеңінен пайдаланылады.

JFET (қосылу өрістік транзисторы) — токтың өтуін жартылай өткізгіштің P-N өткелінің көмегімен бақылайтын құрылғы. Бұл транзистордың негізгі ерекшелігі оның қарапайым құрылымы мен жоғары кіріс кедергісі.

❖ Құрылымы: JFET транзисторының құрылымында үш негізгі бөлік болады: источник (source), дренаж (drain) және гейт (gate). Гейт пен жартылай өткізгіштің арасындағы байланыс жартылай өткізгіштің түріне (P немесе N) байланысты болады. Бұл құрылғыда гейт пен канал арасында P-N өткелі бар, ал осы өткел арқылы электр өрісі жасалады.

❖ Жұмыс принципі: JFET-те гейтке кернеу берілгенде, оның әсерінен P-N өткелінің кеңеюі немесе тарылуы орын алады, ол каналдың өткізгіштігін өзгертіп, токтың өтуін бақылайды. Гейтке теріс кернеу берілгенде, жартылай өткізгіштің өткізгіштігі төмендеп, ток өтпейді.

❖ Негізгі артықшылықтары:

- Жоғары кіріс кедергісі: JFET құрылғысының гейті тек электростатикалық түрде әсер етеді, сондықтан токтың өтуін басқару үшін сыртқы ток қажет емес. Бұл жоғары кіріс кедергісін және төменгі шуылды қамтамасыз етеді.

- Тұрақты жұмыс параметрлері: JFET транзисторларының жұмыс параметрлері тұрақты және ұзақ уақыт бойы өзгермейді. Олар көптеген уақыт бойы сенімді жұмыс істей алады.

- ❖ Қолдану салалары: JFET транзисторлары жоғары сезімталдықты күшейткіштерде, аудио және жиіліктік техникаларда, сондай-ақ сигналдарды өңдеу жүйелерінде қолданылады.

MESFET (металл-жартылай өткізгіш өрістік транзисторы) — металл мен жартылай өткізгіштің контактісін қолданатын құрылғы. Бұл транзистор түрі көбінесе жоғары жиіліктегі қосымшаларда пайдаланылады, себебі ол өте жылдам жұмыс істейді.

- ❖ Құрылымы: MESFET транзисторының құрылымы металл (гейт), жартылай өткізгіш және металдық контактілерден тұрады. Бұл құрылғыда жартылай өткізгіштің бетіне металл қосылады, ал жартылай өткізгіштің материалы көбінесе арсенид галлий (GaAs) болады.

- ❖ Жұмыс принципі: MESFET транзисторында токтың өтуі жартылай өткізгіштің металл бетімен байланыс арқылы бақыланады. Жартылай өткізгіштің өткізгіштігі металл-жартылай өткізгіш байланысының арқасында өзгереді, бұл өз кезегінде токтың өтуін басқарады.

- ❖ Негізгі артықшылықтары:

- Жоғары жиіліктегі жұмыс қабілеті: MESFET жоғары жиіліктегі сигналдармен жұмыс істеуге өте қолайлы, бұл оны радиотехника мен коммуникациялық жүйелерде пайдалану үшін өте тиімді етеді.

- Жоғары жылдамдық: MESFET-тер жоғары жиілікті аналогтық күшейткіштер мен жоғары жиілікті сигналдарды өңдеуде кеңінен қолданылады.

- ❖ Қолдану салалары: MESFET транзисторлары көбінесе жоғары жиілікті қосымшаларда, мысалы, радио сигналдарын күшейту, оптоэлектрондық жүйелер мен жоғары жылдамдықты коммутация жүйелерінде қолданылады.

3. MOSFET құрылымы және жұмыс принципі

MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) — металл-оксид-жартылай өткізгіш өрістік транзисторы, қазіргі электроникада кеңінен қолданылатын компонент. Бұл транзистордың жұмысы электр өрісінің әсеріне негізделген, ал оның басты артықшылықтары — жоғары кіріс кедергісі, төмен қуат тұтыну, жылдам қосылып-ажыралу мүмкіндігі және жоғары жиіліктегі жұмыс.

MOSFET құрылымы үш негізгі бөліктен тұрады: Source, Drain, және Gate. Әр элемент транзистордың жұмысын басқаруға маңызды рөл атқарады.

1) Source:

- ❖ Сөздік — бұл токтың транзисторға кіретін терминалы. MOSFET-тің жұмысында сөздік бөлігі өте маңызды, себебі ток бұл бөлік арқылы MOSFET транзисторына кіреді.

- ❖ Әдетте, сөздік пен дренаж арасындағы кернеу (V_{DS}) электр өрісін қалыптастыруға әсер етеді, ол арқылы каналдағы токтың өтуі реттеледі.

2) Drain:

❖ Дренаж — токтың транзистордан шығатын терминалы. Дренаж — өтетін токтың соңғы нүктесі болып табылады.

❖ Транзистордың жұмысында дренаждың басты рөлі — токтың MOSFET транзисторынан өтуі және сыртқы схемаға жеткізілуі.

3) Gate:

❖ Гейт — транзистордың негізгі басқарушы электроды. Гейт пен канал арасында электр оқшаулағыш қабат (SiO_2) бар, сондықтан гейтке тек кернеу беріледі, ток емес.

❖ Гейтке берілетін кернеу жартылай өткізгіштің өткізгіштігін өзгерту арқылы каналдың ашылуын немесе жабылуын басқарады.

Гейтке кернеу берілуі арқылы каналдың өткізгіштігі реттеледі. Бұл мүмкіндігі MOSFET-ті басқа транзисторлардан ерекшелеп, оны өте жылдам және тиімді етеді.

MOSFET транзисторының жұмыс принципі электр өрісін қолдануға негізделген. Гейтке кернеу берілгенде, ол каналдағы токтың өтуін басқаратын электр өрісін қалыптастырады. Токтың өтуі тек гейтке берілу кернеуіне байланысты болады. Бұл әдіс транзисторды басқару үшін сыртқы токты қажет етпейді, тек кернеу жеткілікті.

1) Гейтке оң кернеу берілуі:

❖ Гейтке оң кернеу ($V_G > 0$) берілгенде, гейт пен жартылай өткізгіш арасында электр өрісі қалыптасады. Бұл өріс жартылай өткізгіштің өткізгіштігін арттырады, сондықтан канал қалыптасып, токтың өтуіне мүмкіндік береді.

❖ Егер гейтке кернеу жеткілікті түрде оң болса, каналдағы өткізгіштік өте жоғары болады, бұл өз кезегінде токтың өтетін каналының ашылуына әкеледі.

2) Гейтке теріс кернеу берілуі:

❖ Егер гейтке теріс кернеу ($V_G < 0$) берілсе, каналдағы электрондар немесе саңылаулар ығыстырылып, канал жабылады. Бұл кезде токтың өтуіне кедергі жасалады.

❖ Теріс кернеу берілуі кезінде инверсиялық канал жабылып, ток тоқтайды.

3) Гейт кернеуінің әсері:

❖ Гейт кернеуі жоғары болғанда, каналдағы өткізгіштік артады. Токтың өтуі оңай болады.

❖ Гейт кернеуі төмендегенде, каналдағы өткізгіштік төмендейді, яғни токтың өтуі қиындайды. Егер гейтке теріс кернеу берілсе, канал толық жабылады.

MOSFET транзисторының негізгі ерекшелігі — оның токты басқару принципі. Гейтке берілетін кернеу каналды ашып-жабатын, соның нәтижесінде токтың өтуін басқаратын фактор болып табылады.

❖ Source пен Drain арасындағы токтың өтуі үшін гейтке оң кернеу берілуі қажет. Осы кернеудің әсерінен жартылай өткізгіштің өткізгіштігі артып, канал қалыптасады. Ток Source-ден Drain-ге қарай өтеді.

❖ Гейтке теріс кернеу берілгенде канал жабылып, токтың өтуі тоқтайды. Бұл MOSFET транзисторын ажыратып, токтың өтуіне кедергі жасайды.

MOSFET транзисторының жұмысын үш негізгі режимге бөлуге болады:

1) Қосылу (On) режимі:

❖ Егер гейтке кернеу жеткілікті оң болса ($V_G > V_{th}$), онда канал қалыптасып, токтың өтуіне мүмкіндік беріледі. Бұл транзистордың қосылған күйі.

❖ V_{th} — шекті кернеу, бұл кернеуден төмен болса, каналдың қалыптасуы мүмкін емес.

❖ Ток Source-ден Drain-ге қарай өтіп, транзистор толық жұмыс істейді.

2) Өшірілу (Off) режимі:

❖ Егер гейтке кернеу теріс болса ($V_G < V_{th}$), канал жабылады және ток өтуі тоқтайды. Бұл транзистордың өшіру күйі.

❖ Өшірілген режимде ток Source пен Drain арасынан өтпейді.

3) Аралық (Saturation) немесе транзистордың күшейту аймағы:

❖ Бұл режимде гейтке кернеу берілгенде, каналдағы өткізгіштік көбейеді, және Drain-Source арасындағы кернеу (V_{DS}) өте жоғары болғанда ток көбейеді.

❖ Бұл режимде MOSFET күшейткіш ретінде жұмыс істейді, себебі ол сигналды күшейту қабілетіне ие.

4. MOSFET транзисторларының ерекшеліктері

❖ Кіру кедергісі өте жоғары, бұл оларға жоғары сенсорлық құрылғылар мен цифрлық схемаларда қолдануға мүмкіндік береді.

❖ Жоғары жылдамдық және төмен қуат тұтыну — бұл оларды көптеген заманауи электронды құрылғыларда қолданысқа енгізуге мүмкіндік береді.

❖ Қуат пен жиілік сипаттамалары MOSFET-ті жоғары қуаттылы жүйелерде пайдалануға мүмкіндік береді.

5. Жұмыс режимдері

MOSFET транзисторының жұмысы бірнеше негізгі режимдерге бөлінеді:

❖ Қосқыш режимі: Гейтке кернеу берілгенде ток өтеді.

❖ Күшейту режимі: Гейтке қажетті кернеу бергенде транзистор күшейткіш ретінде жұмыс істейді.

❖ Тоқсыз режим: Гейтке кернеу жоқ кезде транзистор ток өткізбейді.

6. Жоғары жиілікті және төмен жиілікті қолданбалар

❖ Жоғары жиілікті қолданбалар: MOSFET транзисторларының жоғары жиілікті жұмыс қабілеті олардың радиотехникада, байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылуына мүмкіндік береді.

❖ Төмен жиілікті қолданбалар: Электрлік қуат көздері мен күшейткіш схемаларында MOSFET тиімді жұмыс істейді.

7. Жартылай өткізгіштік технологиялардың дамуы

Өрістік транзисторлардың дамуы жартылай өткізгіштік материалдар мен құрылғылардың технологияларының жетілуімен тығыз байланысты. Қазіргі таңда, MOSFET-тер микрочиптерде, сенсорларда, цифрлық құрылғыларда және қуат басқару жүйелерінде маңызды рөл атқарады.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

1. Өрістік транзистор (FET) дегеніміз не және оның негізгі жұмыс принципі қандай?
2. Gate, Source және Drain терминалдарының функцияларын түсіндіріңіз.
3. JFET пен MOSFET транзисторларының айырмашылығын сипаттаңыз.
4. MOSFET транзисторында тоқты басқару қалай жүзеге асады?
5. Өрістік транзисторлардың негізгі жұмыс режимдерін атаңыз және қысқаша сипаттаңыз (Cut-off, Saturation, Linear).
6. MESFET транзисторы қай салаларда қолданылады және оның ерекшелігі неде?
7. Өрістік транзисторлардың кіріс кедергісі не үшін маңызды?
8. Жоғары жиілікті қолданбаларда қандай FET транзисторлары пайдаланылады және неліктен?
9. CMOS технологиясының негізгі артықшылықтары мен қолдану салаларын атаңыз.
10. Өрістік транзисторлардың радиотехника мен күшейткіштердегі рөлін түсіндіріңіз.

Қорытынды:

MOSFET транзисторлары қазіргі заманғы электроника мен электротехника саласының негізгі элементтеріне айналды, өйткені олардың жоғары кіріс кедергісі, жылдамдығы және қуат тұтыну тиімділігі оларды цифрлық схемаларда, қуат басқару жүйелерінде және жоғары жиілікті қосымшаларда тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Бұл транзисторлардың жұмыс принципі мен режимдері олардың түрлі жүйелерде қолданылуына, сондай-ақ жоғары қуат пен жиілік сипаттамаларына ие болуына ықпал етеді. Жартылай өткізгіштік технологиялардың дамуы MOSFET транзисторларының жұмыс қабілетін арттырып, оларды көптеген жаңа қосымшалар мен шешімдерде пайдалануға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде болашақтың электроникасы мен қуат жүйелерін дамытуға маңызды үлес қосады.

Әдебиеттер тізімі:

1. Sze, S. M. (2002). Semiconductor Devices: Physics and Technology. Wiley-Interscience.
2. Neamen, D. A. (2012). Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles. McGraw-Hill Education.
3. Razavi, B. (2012). RF Microelectronics. Pearson Education.
4. Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2006). Solid State Electronic Devices. Pearson Prentice Hall.
5. Uman, M. A. (2008). Electromagnetic Fields. Wiley-Interscience.

6. Tsividis, Y., & McAndrew, C. (2011). Operation and Modeling of the MOS Transistor. McGraw-Hill.
7. Kang, S. M., & Leblebici, Y. (2003). CMOS Digital Integrated Circuits: Analysis and Design. McGraw-Hill.
8. Jang, J. H., & Lee, H. (2019). Design and Application of MOSFETs: Introduction to Modern Electronics. Springer.
9. Liu, Y., & Zhuang, J. (2016). High-Frequency CMOS Low Noise Amplifiers. Wiley.
10. Razavi, B. (2006). Design of Analog CMOS Integrated Circuits. McGraw-Hill.