

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы



SATBAYEV
UNIVERSITY

№6 ДӘРІС

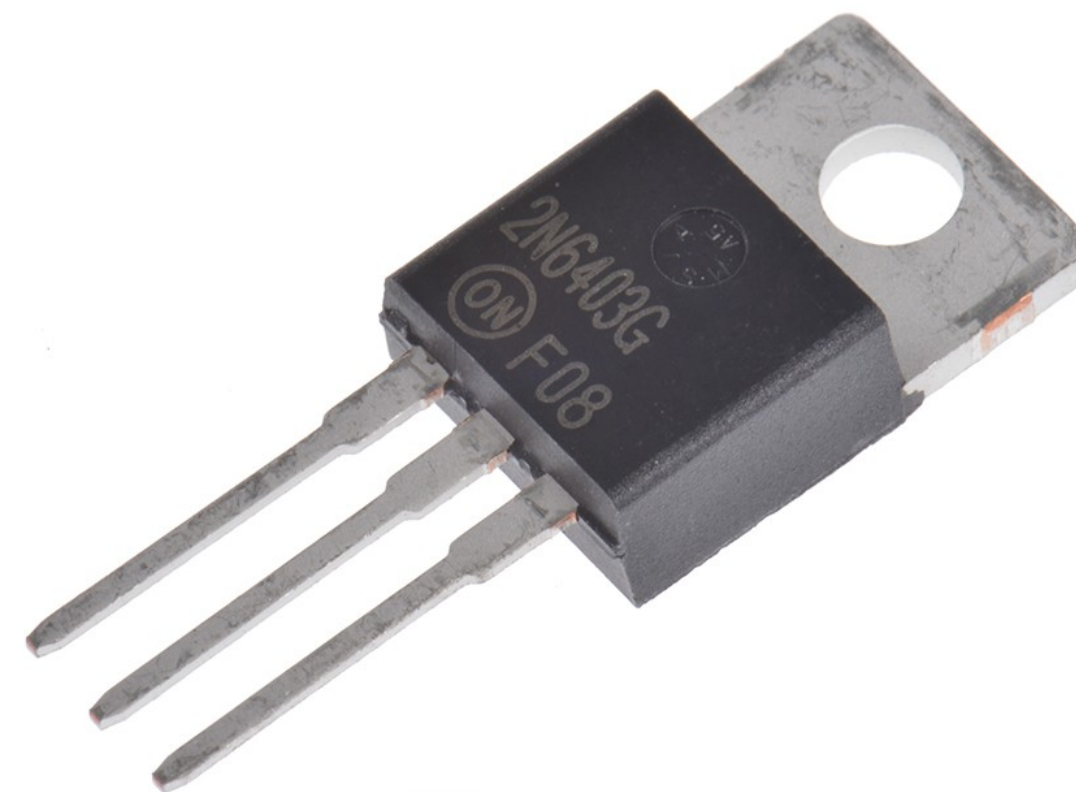
Тақырыбы: «Өрістік транзисторлар: құрылысы, жұмыс істеу принциптері және қолданылуы»

Оқытушы: Хабай А.

ELC5511 «Электроника және схемотехника»

Алматы 2025 ж.

Өрістік транзисторлар: құрылысы, жұмыс істеу принциптері және қолданылуы



Дәрістің мақсаты мен міндеттері



1. Өрістік транзисторлардың түрлерін (JFET, MOSFET) және олардың жұмыс режимдерін түсіндіру.
2. Басқарылатын р–n өтпелі өрістік транзистордың (JFET) құрылысы мен сипаттамаларын талдау.
3. MOSFET транзисторларының құрылымын, арна режимдерін (кедейлену және байыту) қарастыру.
4. КМОЖ транзисторлардың жұмысын түсіндіріп, логикалық схемалардағы артықшылықтарын көрсету.
5. Өрістік транзисторлардың күшейткіш каскадтардағы қолданылуын, эквивалентті схемаларын және негізгі параметрлерін есептеу әдістерін үйрету.
6. Практикалық схемаларда бастапқы қайталағыш пен күшейткіштерді модельдеу нәтижелерімен таныстыру.

Мазмұны

1. Кіріспе
2. Өрістік транзисторларының негізгі түсініктері мен жіктелуі
3. Басқарылатын р-п өткелі бар өрістік транзистордың құрылысы және оның сипаттамалары
4. Өріс транзисторының берілу сипаттамасы р-п басқару ауысуымен
5. Изоляцияланған терезесі және встроенный арнасы бар өрістік транзистордың құрылымы
6. Изоляцияланған затворы және индукцияланған арнасы бар өрістік транзистордың құрылымы
7. Комплементарлы металл-оксид-жартылайөткізгіш (МОЖ) транзисторлар
8. Өріс транзисторларының эквивалентті тізбектері
9. Қорытынды
10. Бақылау сұрақтары

Кіріспе

Өрістік транзисторлар (Field-Effect Transistors, FET) – тоқты электр өрісі арқылы басқаруға негізделген жартылай өткізгіш құрылғылар. Оларды кейде униполярлы транзисторлар деп те атайды, себебі ток тек бір типті заряд тасымалдаушылар арқылы жүзеге асады.

Өрістік транзисторлар биполярлық транзисторлармен салыстырғанда өте жоғары кіріс кедергісімен, төмен қуат тұтынуымен, жылдам әрекет етуімен және интегралды схемаларға ыңғайлығымен ерекшеленеді. Осы себептен олар цифрлық техникада, микроэлектроникада, қуатты күшейткіштерде және логикалық схемаларда кеңінен қолданылады.

Өрістік транзисторларының негізгі түсініктері мен жіктелуі

Поле немесе униполярлы транзисторлар — электр өрісінің әсерімен ток өткізетін арнаның өткізгіштігін өзгерту арқылы токтың өзгеруін жүзеге асыратын жартылай өткізгіш құрылғылар. Шетел әдебиетінде поле транзисторлары FET (field-effect transistor) деп аталады.

Арнаға қосылған электродтар дренаж (Drain) және көзі (Source) деп аталады. Басқарушы электрод затвор (Gate) деп аталады. Басқарушы кернеу затвор мен исток арасында қолданылады. Екі типті биполярлы транзисторлар сияқты, полевые транзисторлар да р- типті немесе n- типті арнаға ие болуы мүмкін. Ток арнада тек бір типті зарядтардың: р- типті арнада электрондардың немесе n- типті арнада қуыс (дырка) түрінде өтеді. Полевые транзисторлардың ең маңызды артықшылықтарының бірі — өте жоғары кіріс кедергісі (бірліктерден жүздеген мегомға дейін), бұл сызықтық күшейткіш құрылғыларды жобалау кезінде өте маңызды. Екінші жағынан, биполярлы транзистор кіріс тогының өзгерісіне полевой транзисторға қарағанда сезімтал болып келеді, сондықтан биполярлы транзистор полевойдан үлкенірек күшейтуді қамтамасыз ете алады.

Полевые транзисторлар температура өзгерістеріне тұрақтылығымен, көлемі жағынан кішкентайлығымен және өндірістік технологиясының жеңілдігімен ерекшеленеді. Бұл полевые транзисторларды интегралдық схемаларды өндіруде әсіресе пайдалы етеді.

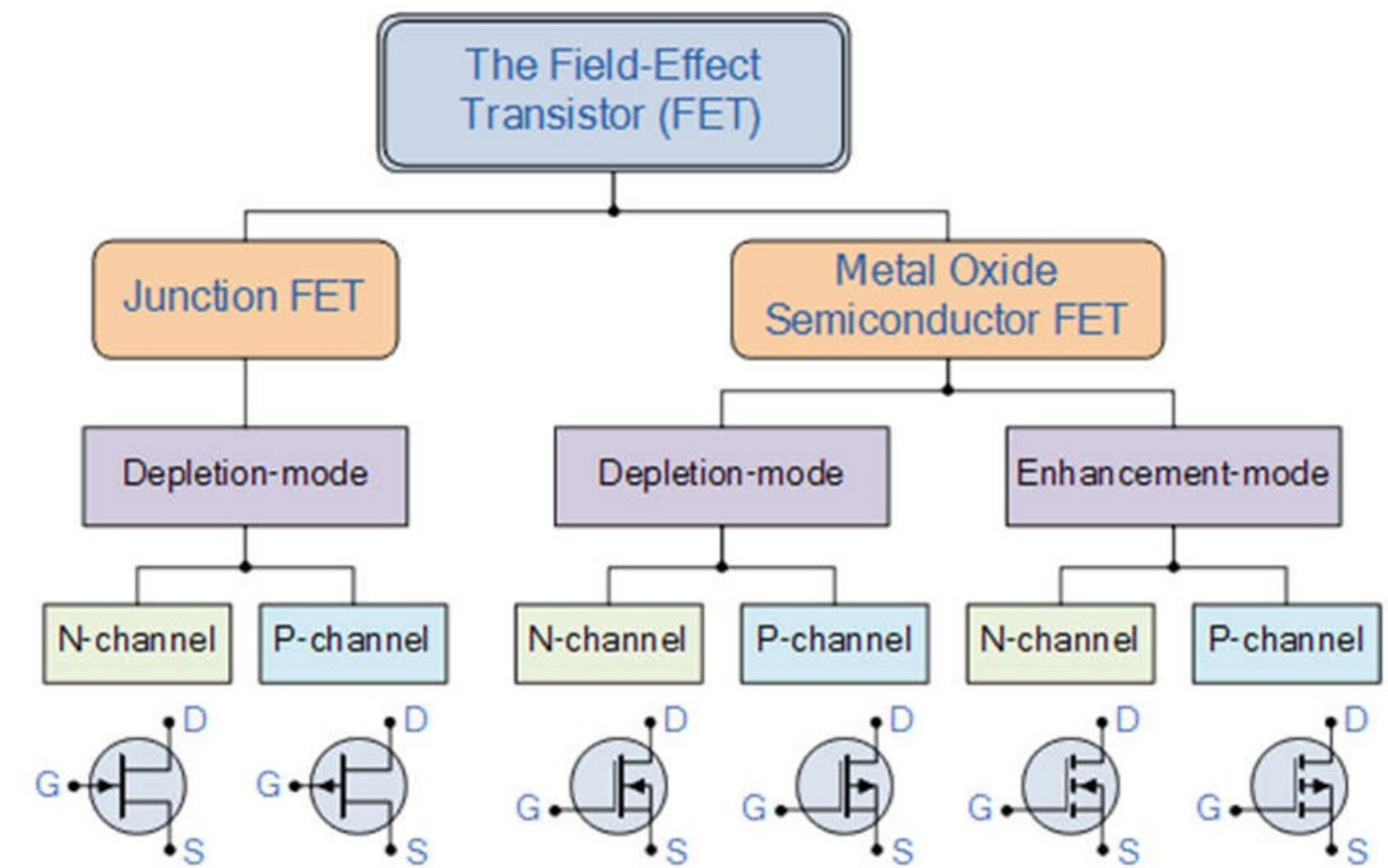
Полевые транзисторлардың екі түрі қолданылады:

- Басқарылатын p-n өтпелі полевые транзисторлар (junction field-effect transistor (JFET));
- Изолированный затворлы полевые транзисторлар (metal-oxidesemiconductor field-effect transistor (MOSFET)); отандық әдебиетте оларды (МОЖ – металл – оксид кремния – жартылай өткізгіш) немесе (ЖӨМД – жартылай өткізгіш металл-диэлектрик.) деп атайды.

MOSFET транзисторлар категориясы арнаның ішкі болуымен жұмыс істейтін обогащение режиміндегі полевые транзисторларға және индуцированный арнамен жұмыс істейтін обеднение режиміндегі полевые транзисторларға бөлінеді.

MOSFET транзисторы цифрлық компьютер техникасын әзірлеу мен өндірісте маңызды элементке айналды. Алайда, полевые транзисторларды қолмен ұстағанда абай болу қажет, себебі олар сыртқы электрлік өрістерге өте сезімтал.

3.1-сурет. өрістік транзисторлардың әртүрлі типтерінің классификациясы мен шартты белгілеулерін көрсетеді.



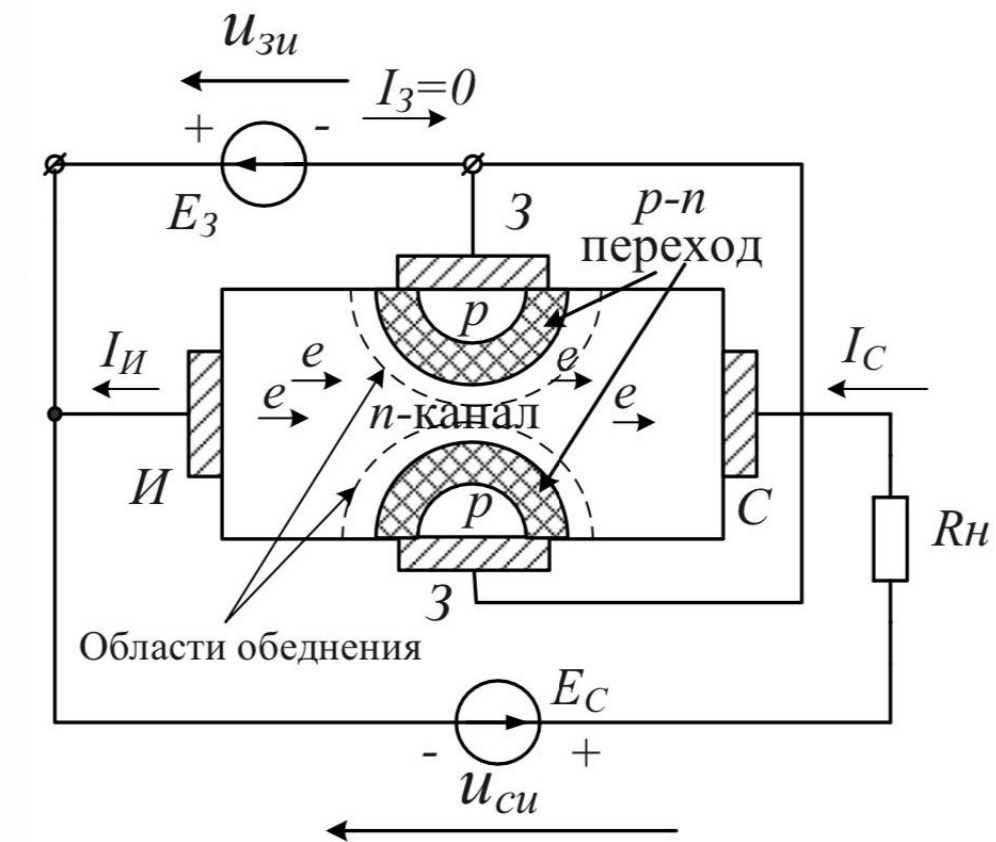
3.1-сурет. өрістік транзисторларының классификациясы мен шартты белгілеулері

Басқарылатын р-п өткелі бар өрістік транзистордың құрылысы және оның сипаттамалары

Басқарылатын р-п өтпелі өрістік транзистордың және п -типті каналының құрылымы Сурет. 3.2-де көрсетілген. Сток (С) пен исток (И) арасында стоктық кернеу көзі E_c және жүктеме кедергісі R_n қосылған. Сток пен исток электродтары р-типті полупроводниковый қабатпен жалғанған. Стокта оң кернеу қосылған. Үшінші электрод – затвор (3) теріс кернеуге $U_{зи}$ қосылған және р-типті полупроводниковый материалмен жалғанған. Полупроводниковый материалдардың әртүрлі типтері арасында р-п өтпелі пайда болады. р-п өтпелінің айналасында бос заряд тасымалдаушылардың «таусылу» аймақтары қалыптасады.

Егер затворде және $U_{зи} < 0$ болса, р-п өтпелі жабық. Затвордағы ток нөлге тең. Кері кернеу ұлғайған сайын р-п өтпелі кеңейеді және р-типті өткізгіш каналдың көлденең қимасы азаяды. Теріс басқарушы кернеу исток пен сток арасындағы токты азайтады және осы токты қозғалмалы электрондармен басқарады.

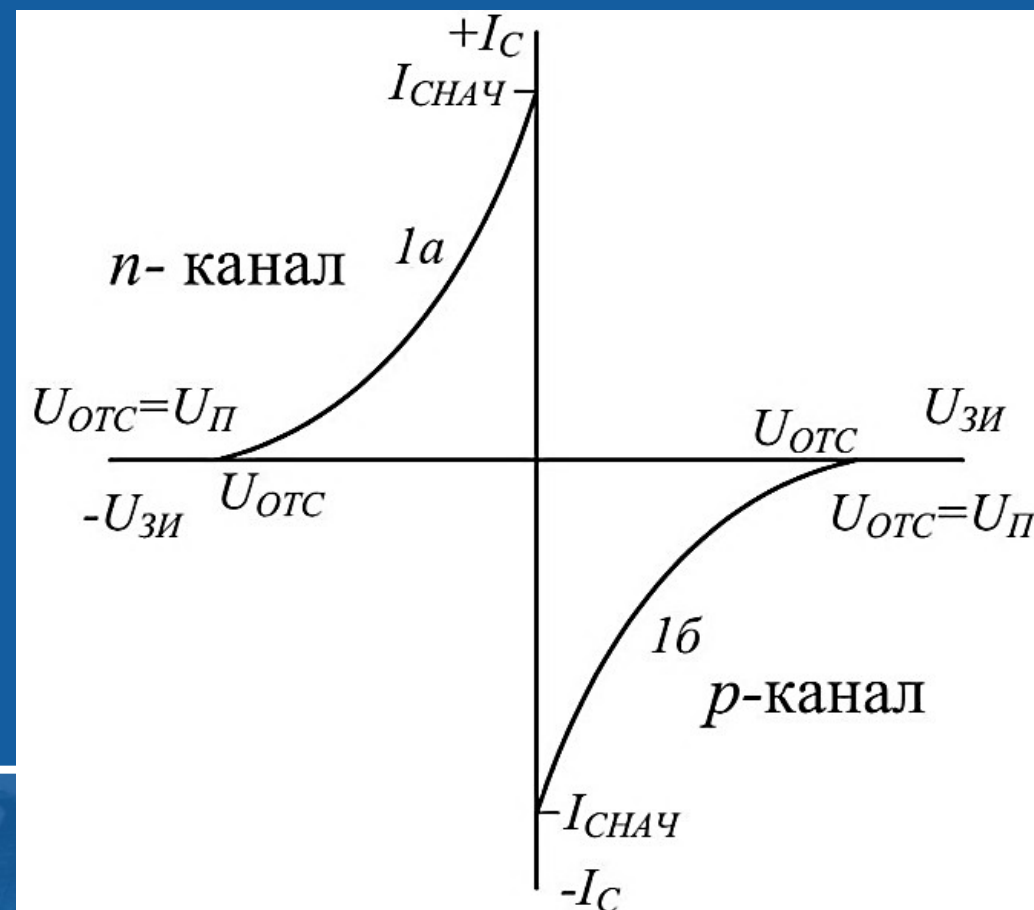
Полевом транзисторында басқарушы р-п өтпелі және р-типті каналда стокқа теріс кернеу, затворге оң кернеу беріледі, ал р-каналдағы ток бос оң зарядтармен (кмтіктермен) анықталады.



3.2-сурет. Р-п ауысуын басқаратын өріс транзисторының құрылысы және п типті арна

Өріс транзисторының берілу сипаттамасы р-п басқару ауысуымен

Өріс транзисторларының берілу сипаттамалары ағызу тогының $I_C(U_{ЗИ})$ қақпа-көз кернеуіне тәуелділігі ретінде көрсетіледі. Сапалы тасымалдау сипаттамаларының түрі (3.3-суретте.) көрсетілген.



3.3- сурет. Өріс транзисторының берілу сипаттамалары р-п ауысуын басқару

Бұл транзистордың шекті кернеуі бар $U_{OTC} = -5,74$ В.
Бастапқы ток $I_{CHACH} \approx 85$ мА.

Тұрақты кернеуде $U_{СИ}$ беріліс өнімділігі квадраттық функциямен жақын сипатталады:

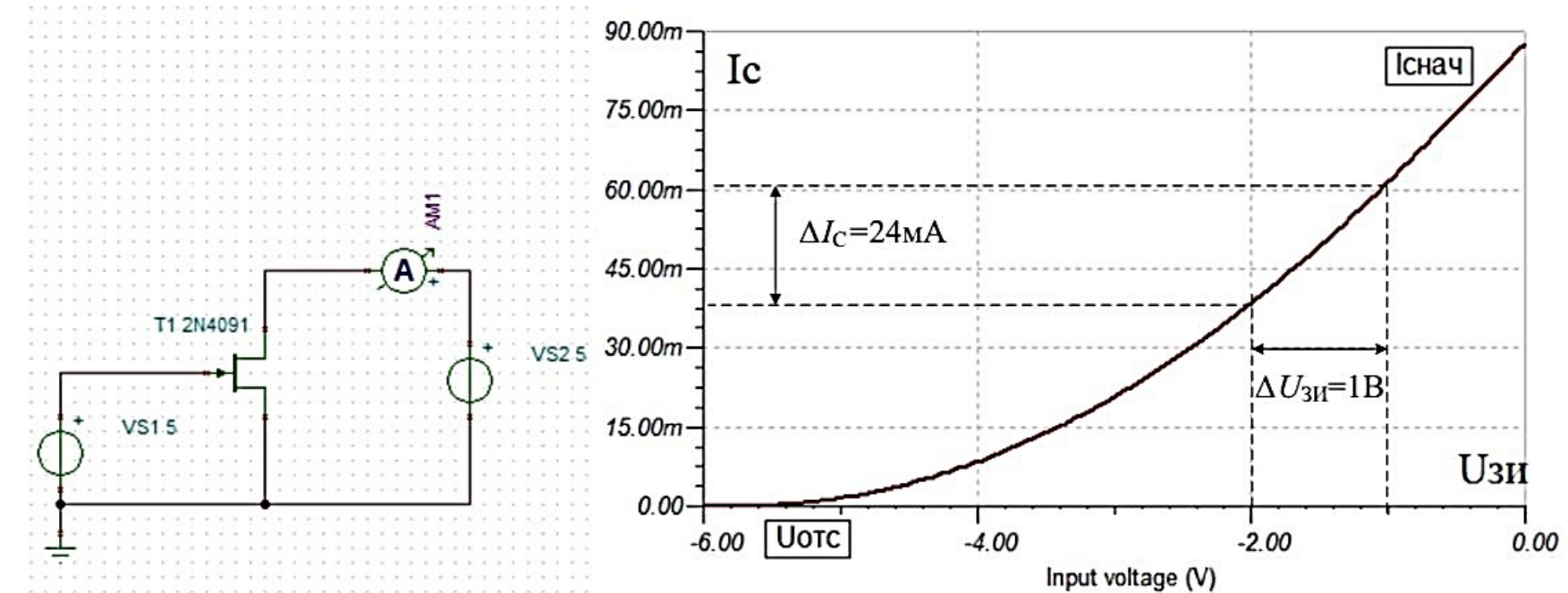
$$I_C \approx I_{CHACH} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{OTC}}\right)^2$$

Күшейту қасиеттері беріліс қорабының тіктігімен анықталады ВАС:

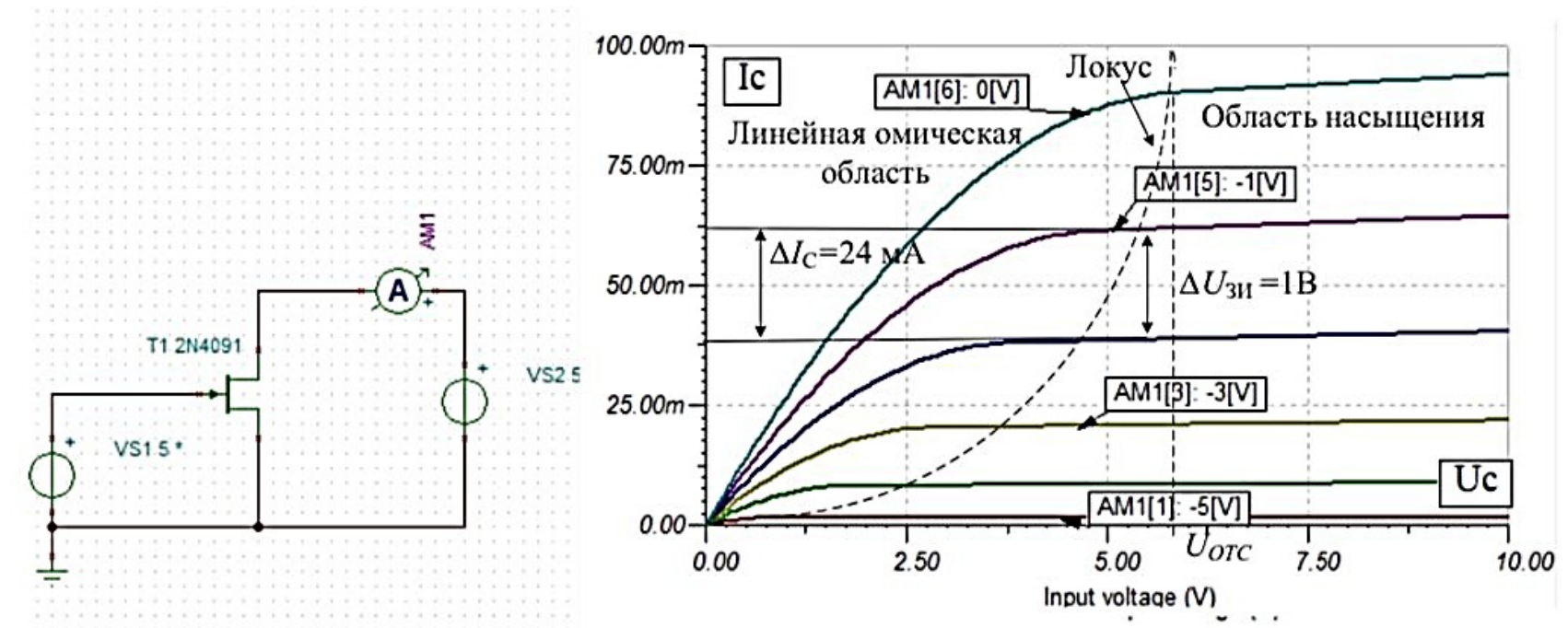
$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} = 24 \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

Өрістік транзистордың шығыс сипаттамалары деп сток тогының I_C сток-исток кернеуіне $U_{СИ}$ тәуелділігін атайды. Шығыс сипаттамалар сериясын әртүрлі исток кернеулерінде $U_{ЗИ}$ алады.

Суретте.3.5 өлшеу схемасы және өрістің Шығыс сипаттамалары көрсетілген транзистор 2N4091.



3.4-сурет. Өріс транзисторының берілу сипаттамасы р-п басқару ауысуымен



3.5- сурет. 2N4091 өріс транзисторының Шығыс сипаттамалары

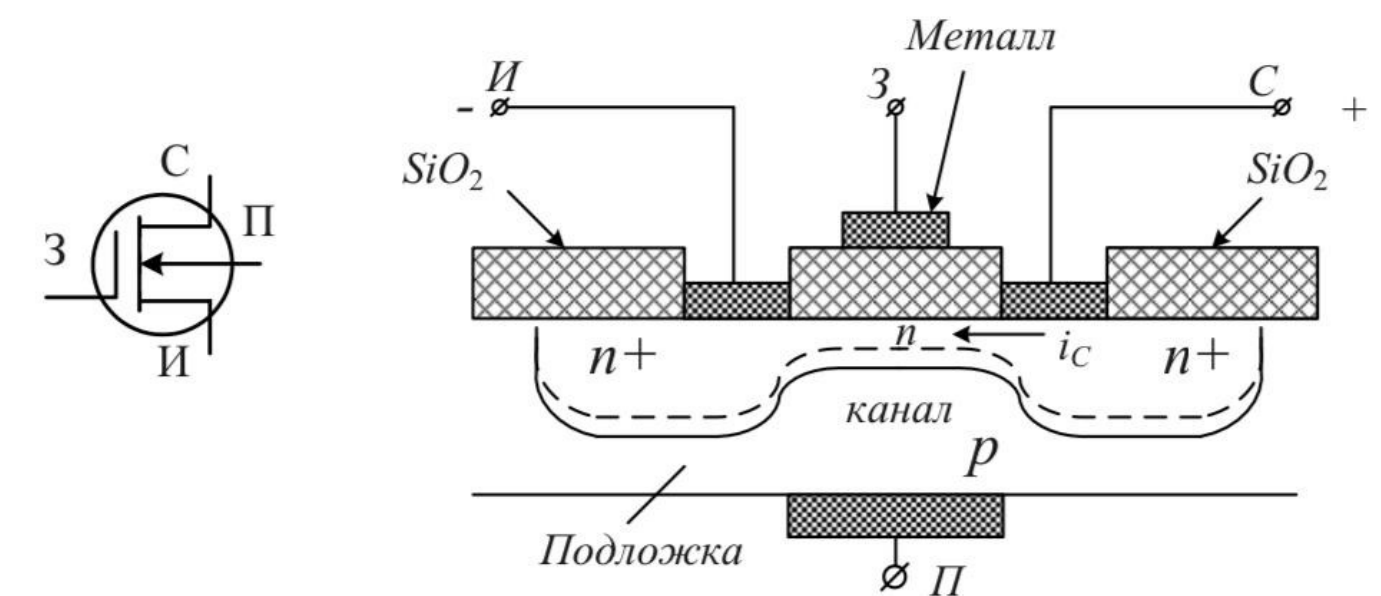
Изоляцияланған терезесі және встроенный арнасы бар өрістік транзистордың құрылымы

P типті жартылай өткізгіш материалдың субстратында кремний диоксиді окшаулағыш жабыны бар. Металл электродтары және ағынды сулар субстрат материалына қолданылады. Металл қақпа электроды диэлектрлік қабатпен субстраттан окшауланған. Бастапқы және ағынды суларда жартылай өткізгіш материалда n^+ тасымалдаушыларымен байытылған қатты легирленген аймақтар бар.

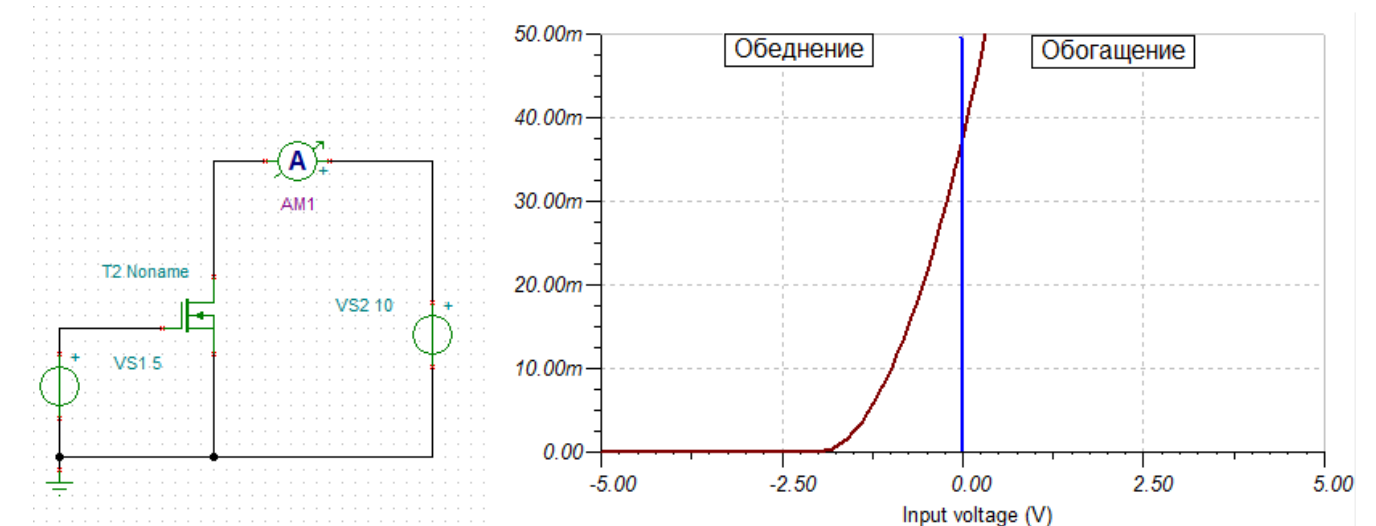
Сток электр көзіне плюспен қосылады. Затвор астындағы легирленген аймақтар арасында n -типа кіріктірілген арна бар, онда $U_{зи} = 0$ кезінде $I_{Снач}$ тогы бар. Егер $U_{зи} > 0$ болса, электрондар каналға тартылып, ток артады. Егер $U_{зи} < 0$ болса, ток азаяды.

3.7-суретте.өлшеу схемасы мен беру кестесі көрсетілген n типті арнасы бар МОП Транзисторы үшін. Шекті кернеудің шамалы теріс мәні бар. Транзистор сарқылу режимінде жұмыс істейді (depletion-type MOSFET). Бұл үшін басқару кернеуі затворда теріс ($U_{зи} < 0$) етіп жасалады. Бұл кернеу «электрондарды» арнаның ішінен субстратының аймағына «ығыстырады», осылайша арнаны кедейлендіріп, ағын токты азайтады.

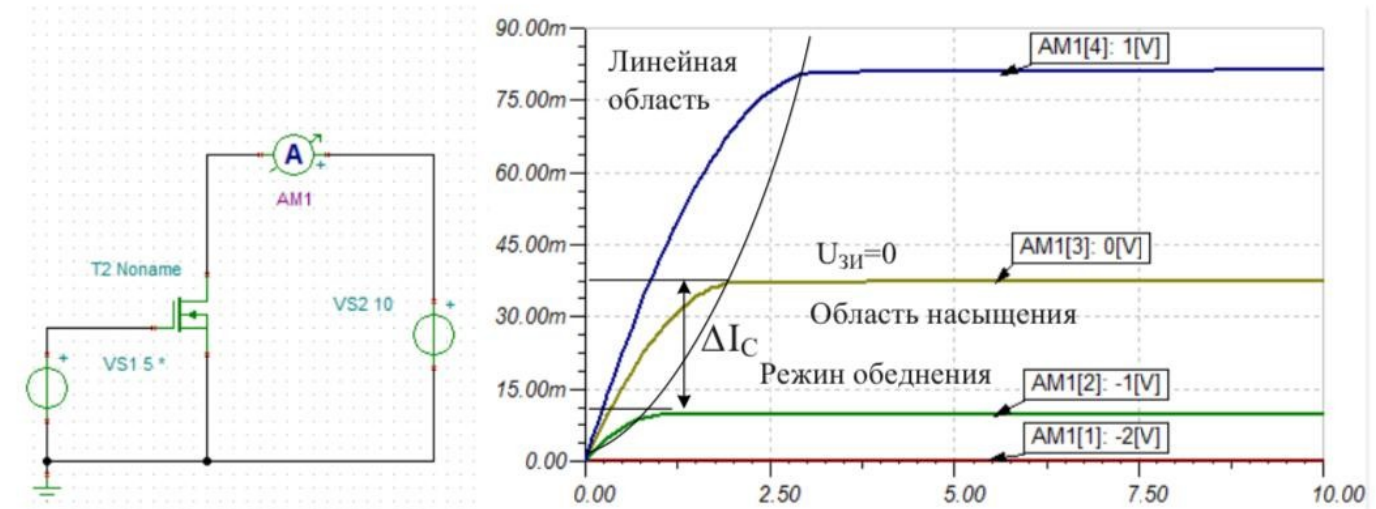
3.8-суретте осындай транзистордың шығыс сипаттамалары көрсетілген. Онда басқарушы p - n ауысуымен транзистордағыдай сызықтық омикалық аймақ және транзистордың күшейту қасиеттері жүзеге асатын қанығу аймағы бар. Кедейлену режимі $U_{зи} < 0$ сипаттамаларына сәйкес келеді. Шығыс сипаттамаларына қарағанда, зерттелген экзеплдің $S = 17 \frac{mA}{B}$ крутылығы байқалады.



3.6-сурет. Кірістірілген n типті арнасы бар МОП транзисторының құрылымы



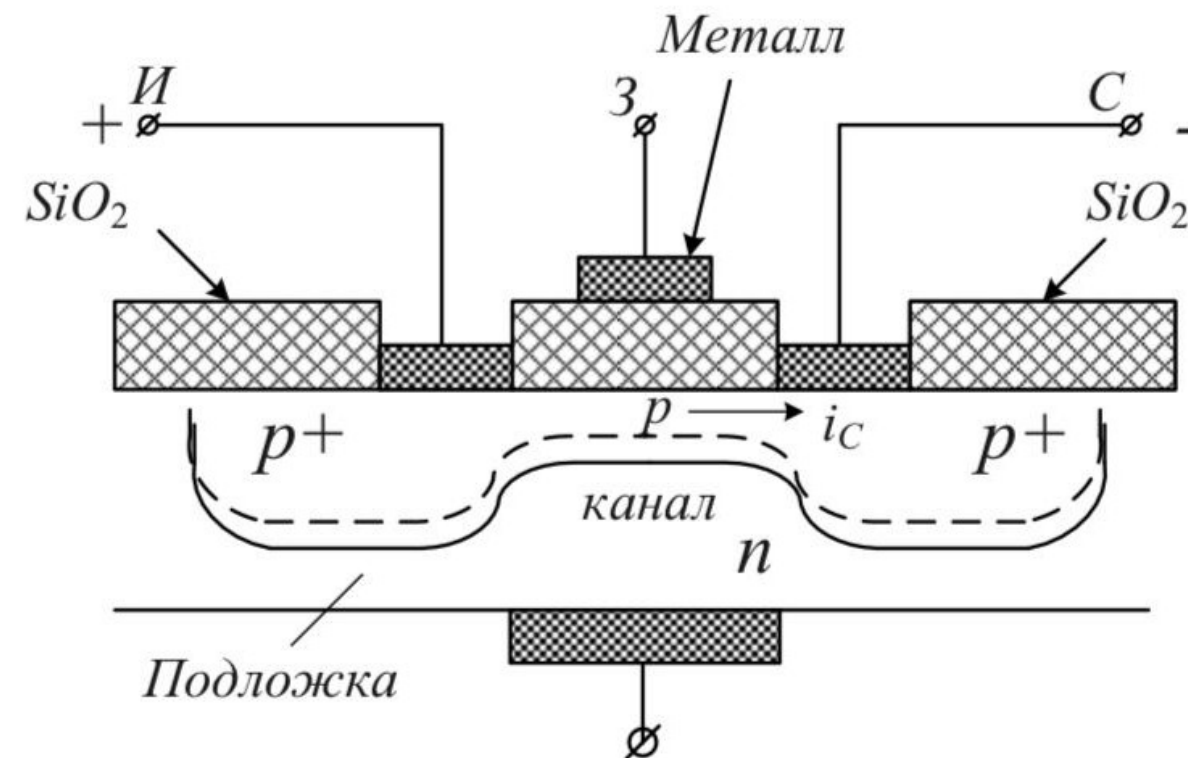
3.7-сурет. Өлшеу схемасы және МОП беріліс сипаттамасының графигі n типті



3.8-сурет. Кірістірілген МОП транзисторының Шығыс сипаттамалары n типті арна.

Интегралды арнасы бар өрістік транзисторлар ағын токта теріс кернеулерде жұмыс істейді. Кедейлену режимінде затворға оң кернеу беріледі, ол арнаның ішінен оң заряд тасымалдаушыларын (бұдырларды) «ығыстырып», арнаны кедейлендіріп, ағын токты азайтады.

3.9-сурет р-типті интегралды арнасы бар МОП транзисторының құрылымы көрсетілген.



3.9-сурет. Р-типті интегралды арнасы бар МОП транзисторының құрылымы

Изоляцияланған затворы және индукцияланған арнасы бар өрістік транзистордың құрылымы

N-типті индукцияланған арнасы бар өрістік транзистордың құрылымы 3.10-суретте көрсетілген. Егер $U_{зи}=0$ болса, арна тасымалдаушылармен кедейленеді және $I_c=0$. Транзисторды $p+$ тасымалдаушылармен легирленген облыстар мен p -типті субстрат арасындағы жабық p - n ауысуларынан тұратын екі кері қосылған диод түрінде көрсетуге болады.

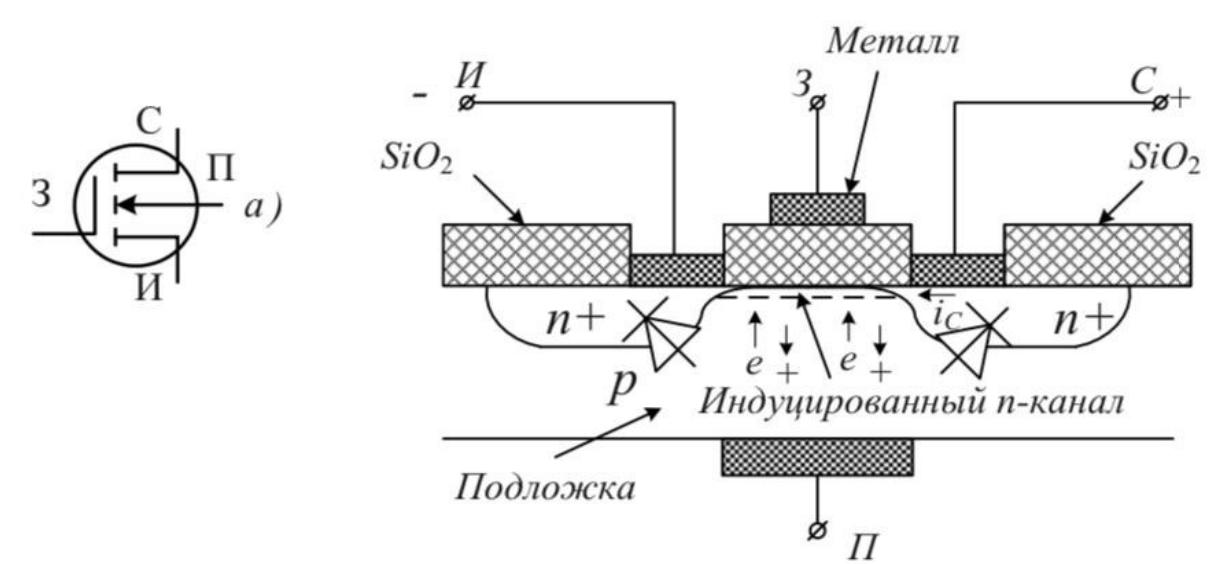
Затвордағы оң кернеу шекті мәннен ($U_{зи} > U_{пор}$) асқанда, затвордың электрлік өрісі арна аймағына $p+$ облысынан электрондарды тартып, арнаның өткізгіштігін арттырады. Сондықтан арна индукцияланған деп аталады, ал транзистордың жұмыс режимі байыту режимі (enhancement-type MOSFET) деп аталады.

Индукцияланған p -типті арнасы бар 2N6758 МОП транзисторының схемасы мен беру сипаттамасы 3.11-суретте көрсетілген. Транзистор шекті кернеу $U_{пор} > 2 \div 5V$ болғанда ашылады.

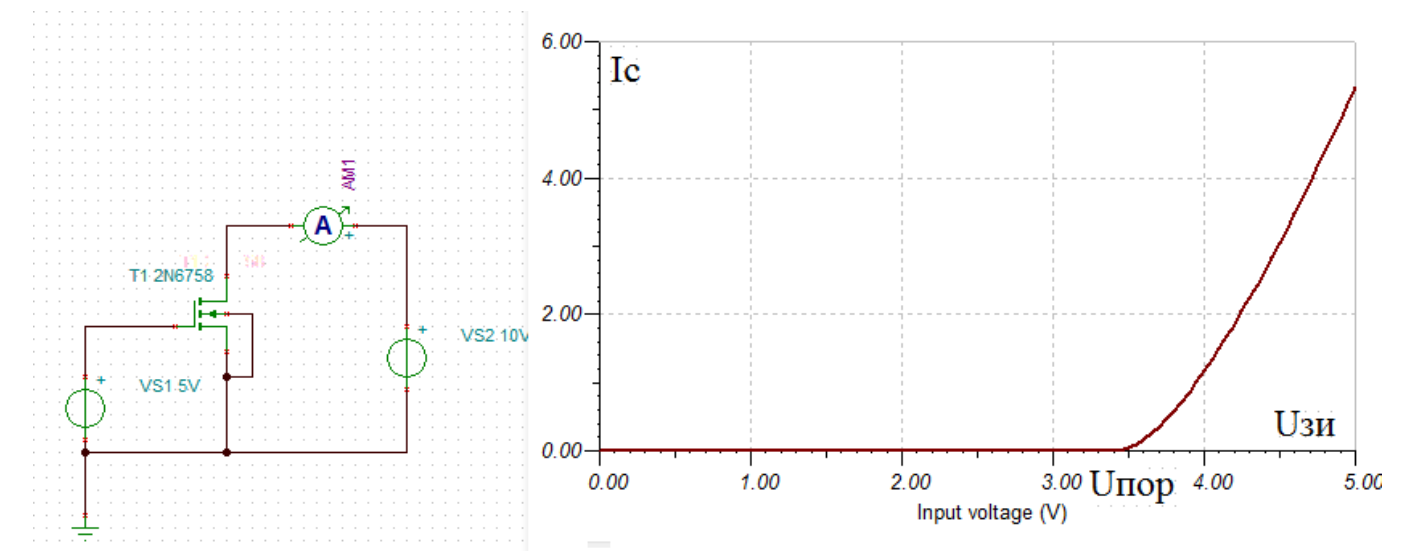
Индукцияланған арнасы бар өрістік транзисторлар тек $|U_{зи}| > |U_{пор}|$ шартымен басқарылады.

Индукцияланған p -каналды өрістік транзисторлар сток пен затворда теріс кернеулерде жұмыс істейді.

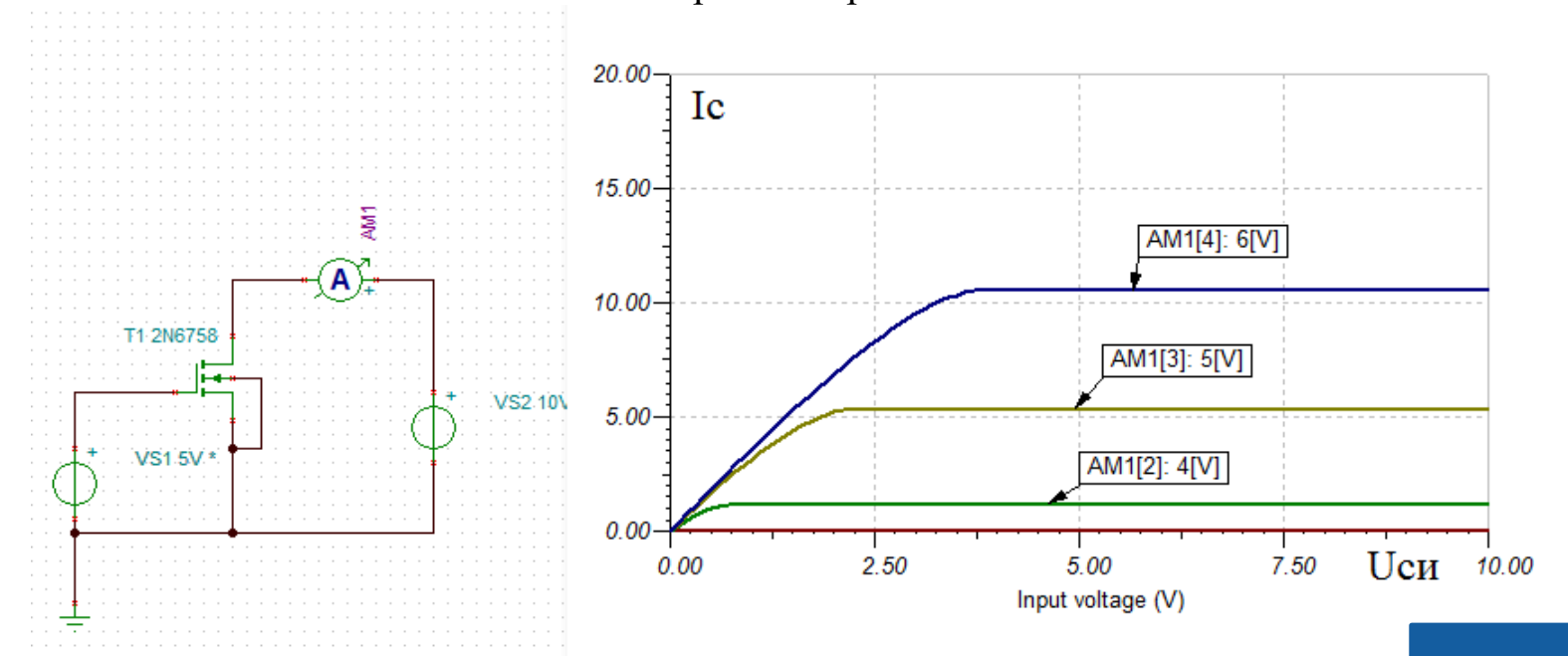
3.13-суретте түрлі типтегі өрістік транзисторлардың беру сипаттамаларының жинақталған диаграммасы көрсетілген. Диаграмма питаушы кернеулердің полярлығын және басқару кернеулері $U_{зи}$ деңгейлерін сапалы анықтауға мүмкіндік береді.



3.10-сурет.. Индукцияланған МОП транзисторының дизайны p типті арна



3.11-сурет.. МОП өлшеу схемасы және беріліс сипаттамасы p типті индукцияланған арна Транзисторы

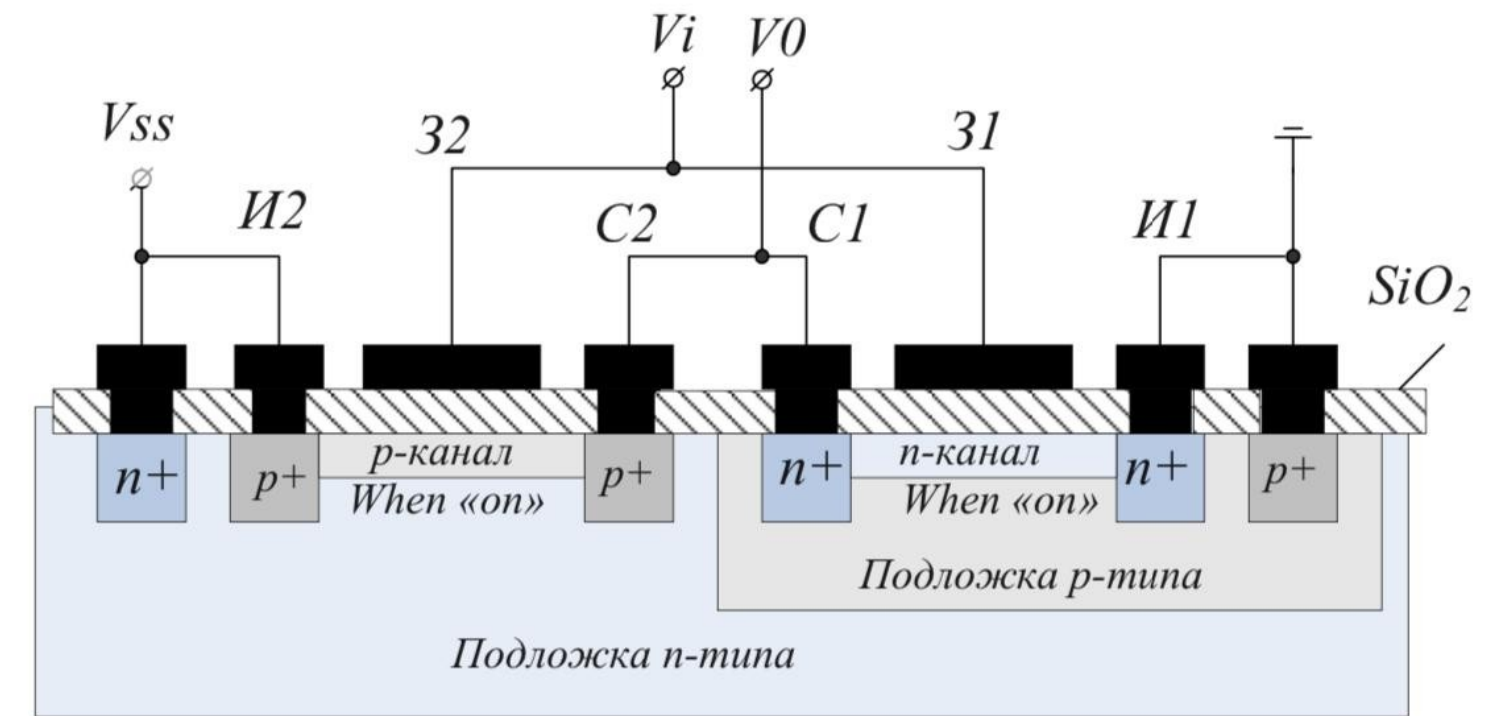


3.12-сурет. Өлшеу схемасы және шығу сипаттамалары N типті индукцияланған Транзисторы

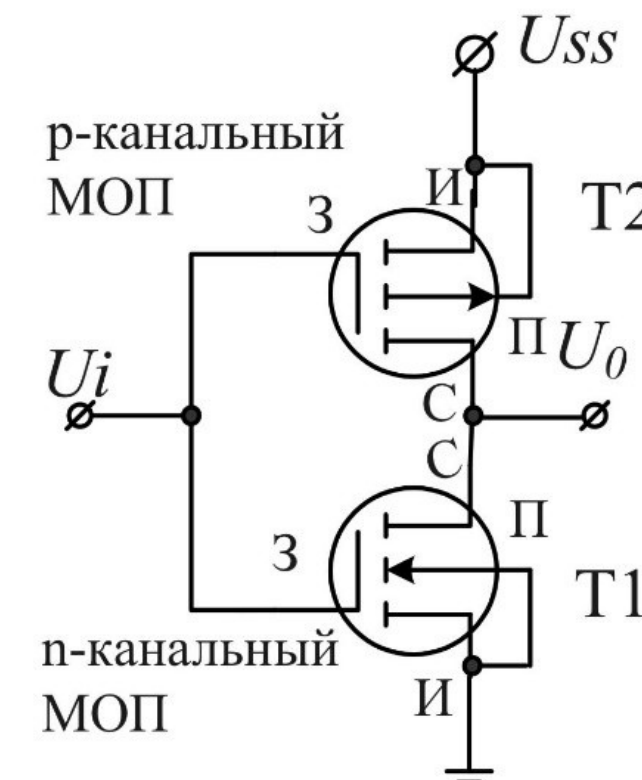
Комплементарлы металл-оксид-жартылайөткізгіш (МОЖ) транзисторлар

Егер бір және сол субстратта р-каналды және п-каналды МОЖ транзисторларды құрастыратын болсақ, өте тиімді логикалық схемаларды жасауға болады (3.14-сурет). Индуцирленген р-канал сол жақта, ал индуцирленген п-канал оң жақта орналасқанын атап өтейік, сәйкесінше р- және п-каналды транзисторлар үшін. Мұндай конфигурация комплементарлы комплементарлы металл-оксид-жартылайөткізгіш (КМОЖ) транзисторлары деп аталады, олар логикалық құрылғыларда кеңінен қолданылады. Жоғары кіріс кедергісі, жылдам ауысу жылдамдығы, төмен қуат тұтыну КМОЖ микросхемаларын жобалаумен байланысты жаңа пәннің пайда болуына әкелді.

Структураның қосылу схемасы (3.14-сурет) инвертердің (3.15-сурет) принциптік схемасын жүзеге асыруға мүмкіндік береді, ол қолданылған сигналды инвертейді.



3.14-сурет Комплементарлы өрістік транзистор КМОЖ құрылымы



3.15-сурет. Инвертор схемасы

Өріс транзисторларының эквивалентті тізбектері

Кернеу көзі E_3 затвордағы қажетті ығысу кернеуін жасайды. E_C кернеу көзі сток тізбегін қоректендіретін кернеуді қамтамасыз етеді. Айнымалы сигнал көзі $U_{\text{кір}}$ затвор мен стоктың арасына қосылған. Шығыс сигналды сток тізбегіндегі R_H резисторынан алады.

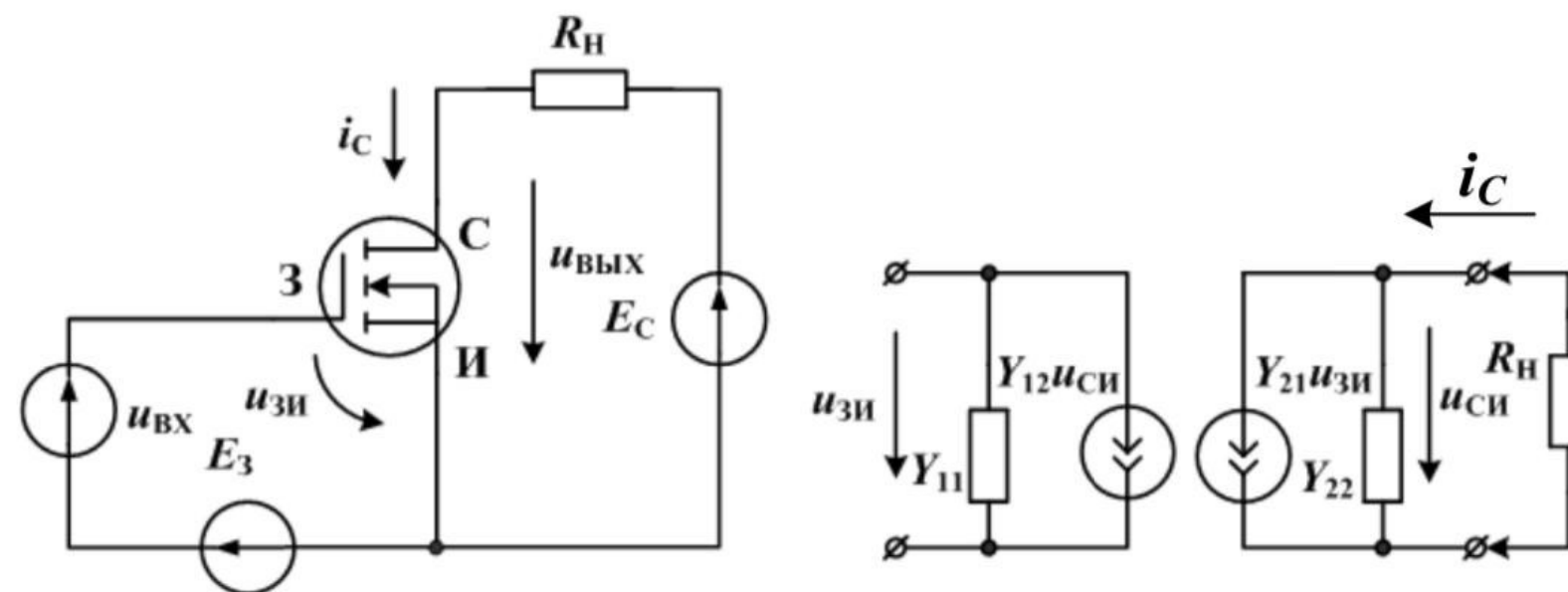
Төмен жиіліктегі күшейткіш каскадтың алмастыру схемасында, кіші сигналдар үшін айнымалы кіріс кернеуі $U_{\text{зи}}$ басқарылатын ток көзі арқылы стоктың айнымалы тогына I_c түрленеді, бұл жүктемеде шығыс кернеуін $U_{\text{си}}$ жасайды.

Кіші сигналдарды жуықтап есептегенде, өрістік транзисторды Y -параметрлеріндегі төртполюсникпен алмастырады.

$$I_z = y_{11}u_{\text{зи}} + y_{12}u_{\text{си}} \quad i_c = y_{21}u_{\text{зи}} + y_{22}u_{\text{си}}$$

Бұл теңдеулерде:

y_{11} -транзистордың қақпасының ағып кетуінің өткізгіштігі, y_{22} -Шығыс өткізгіштігі, $y_{21}=s$ -өріс транзисторының көлбеуі (немесе түзудің өткізгіштігі беру), y_{12} -кері беріліс өткізгіштігі. Әдетте, мәнін $y_{11}=y_{12}=0$ деп есептейді. Шығыс өткізгіштік $y_{22} = \frac{1}{R_{\text{шығ}}}$, мұнда $R_{\text{шығ}}$ тең 30 кОм немесе одан жоғары құрайды.



3.16-сурет. МОЖ транзисторындағы күшейткіш схемасы және ауыстыру схемасы

Қорытынды:

Өрістік транзисторлар қазіргі заманғы электрониканың негізгі элементтерінің бірі болып табылады. Олардың жоғары кіріс кедергісі, шағын өлшемдері және аз қуат тұтынуы оларды интегралды схемаларда, цифрлық техникада, байланыс құрылғыларында және қуатты басқару жүйелерінде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

JFET және MOSFET транзисторларының әртүрлі режимдері инженерлерге схемалардың қажетті сипаттамаларын алуға жағдай жасайды. КМОЖ технологиясы негізіндегі транзисторлар энергия үнемдейтін, жоғары жылдамдықты логикалық құрылғылардың дамуына жол ашты.

Демек, өрістік транзисторларсыз қазіргі цифрлық және аналогтық электрониканы елестету мүмкін емес.

Бақылау сұрақтары

1. Өрістік транзисторлардың биполярлық транзисторлардан негізгі айырмашылығы неде?
2. FET-тің негізгі электродтарын атаңыз және олардың қызметін түсіндіріңіз.
3. Өрістік транзисторлардың қандай түрлері бар?
4. Басқарылатын р–n өтпелі өрістік транзистордың (JFET) жұмыс принципін түсіндіріңіз.
5. JFET-тің берілу сипаттамасы қандай теңдеумен сипатталады?
6. MOSFET-тің кедейлену режимі мен байыту режимінің айырмашылығы неде?
7. КМОЖ транзисторлары қандай артықшылықтарға ие?
8. Өрістік транзистордың эквивалентті схемасы қандай параметрлермен сипатталады?
9. Өрістік транзистордың күшейту қасиетін анықтайтын «тіктік» (S) қандай физикалық мәнді білдіреді?
10. Өрістік транзистордағы бастапқы қайталағыштың (source follower) негізгі ерекшеліктерін атаңыз.
11. Неліктен өрістік транзисторлар цифрлық логикалық микросхемаларда кең қолданылады?
12. MOSFET-тің арнасы қандай жағдайда индукцияланады?
13. Күшейткіш схемада жұмыс нүктесін таңдау не үшін қажет?
14. Жұмыс нүктесін графикалық әдіспен қалай анықтайды?
15. КМОЖ инвертор қалай жұмыс істейді?

Назарларыңызға рақмет!

