

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

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



SATBAYEV
UNIVERSITY

№2 ДӘРІС

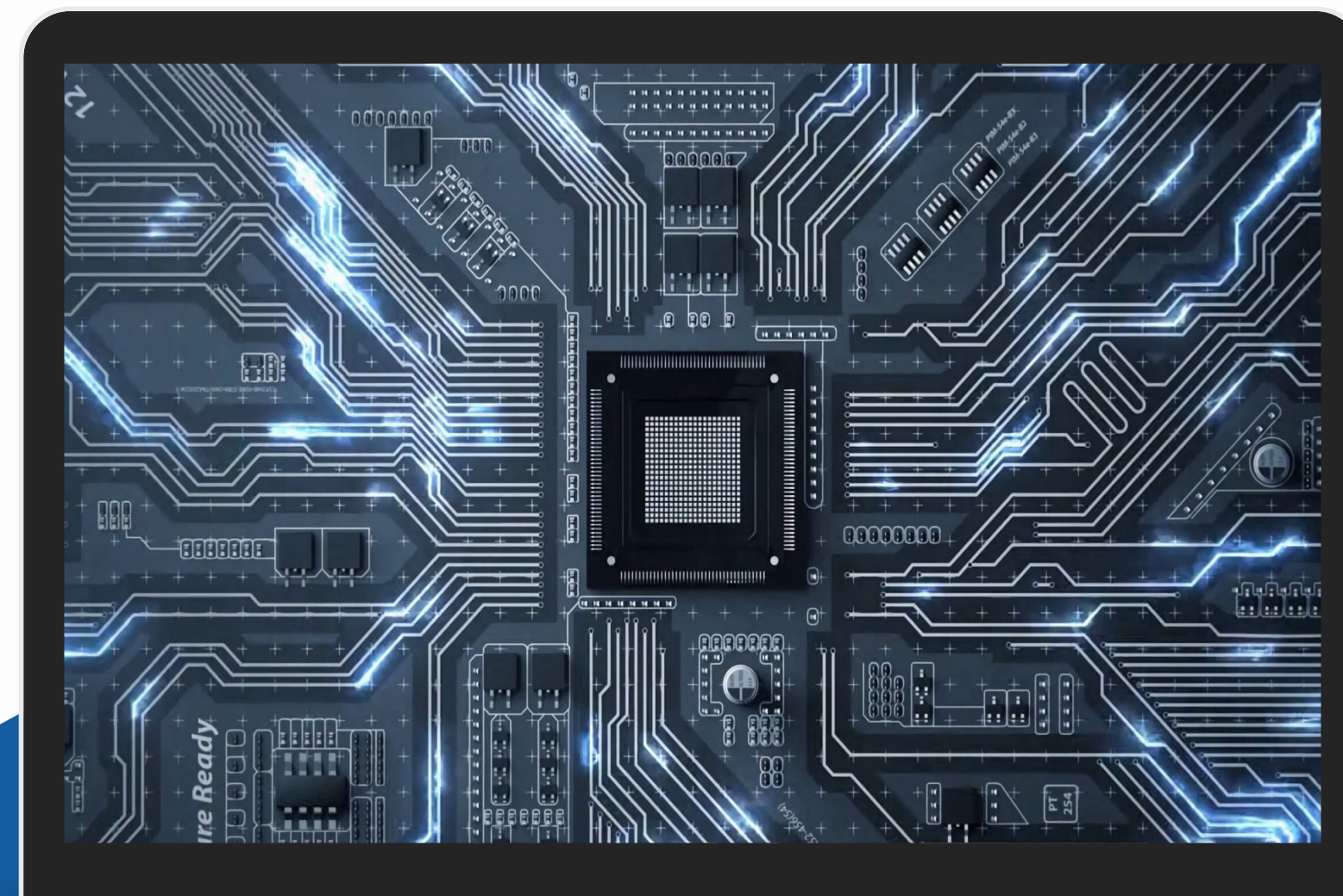
Тақырыбы: Жартылай өткізгіш диодтар: құрылымы, сипаттамалары және қолданылуы

Оқытушы: Хабай А.

ELC5511 «Электроника және схемотехника»

Алматы 2025 ж.

Жартылай өткізгіш диодтар: құрылымы, сипаттамалары және қолданылуы



Дәрістің мақсаты мен міндеттері:



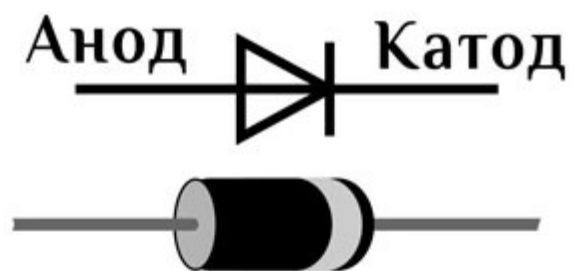
- Жартылай өткізгішті диодтың құрылымын, жұмыс принципін және оның негізгі режимдерін түсіндіру.
- p – n өткеліндегі физикалық құбылыстарды (диффузия, дрейф, кеңістік заряды, потенциалдық тосқауыл) қарастыру.
- Диодтың ток–кернеу сипаттамасын (BAC) тәжірибелік және теориялық тұрғыдан талдау.
- Диодтың эквивалентті тізбектері мен сызықтық жуықтау әдістерін меңгеру.
- Арнайы диод түрлерін (Шоттки, туннель, варикап, жарықдиод, фотодиод, стабилитрон) қолдану салаларын үйрену.
- Диод пен зерер диодтары бар тұрақты ток тізбектерін есептеу дағдыларын қалыптастыру.

Жоспар:

1. Кіріспе
2. Жартылай өткізгіш диод
3. Жартылай өткізгішті диодтың ток кернеуінің сипаттамасы
4. Диодтардың эквивалентті тізбектері
5. Жартылай өткізгіш диодтардың арнайы түрлері
6. Қорытынды
7. Бақылау сұрақтары

Кіріспе

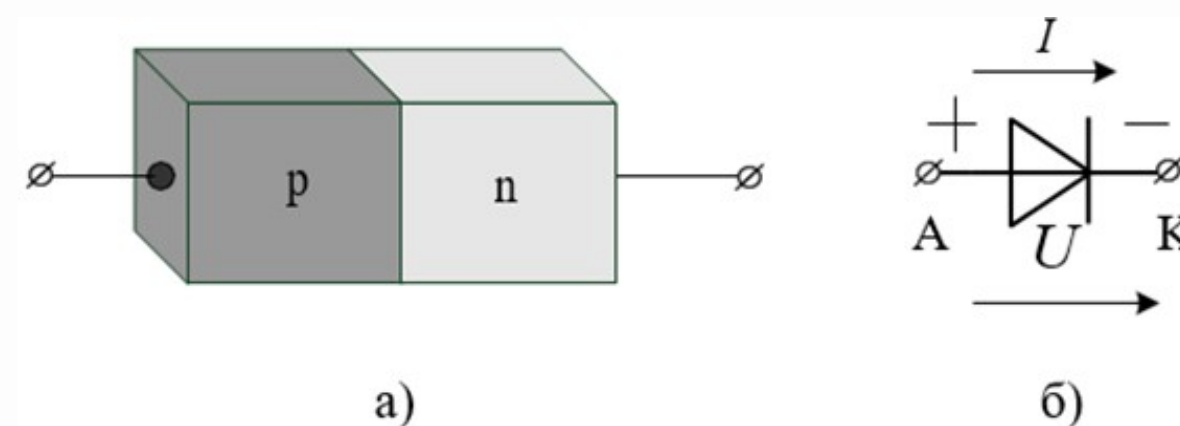
Жартылай өткізгіш диодтар – электрониканың ең қарапайым әрі ең маңызды элементтерінің бірі. Олардың негізінде түзеткіш құрылғылар, қоректендіру көздері, сигналды түрлендіретін, күшейтетін және шектейтін тізбектер жасалады. р–n өткелінің қасиеттерін білу – транзисторлар, тиристорлар, интегралды схемалар сияқты күрделі құрылғыларды түсінудің негізгі қадамы болып табылады.



Жартылай өткізгішті диод

Жартылай өткізгішті диод - екі терминалы бар және бір (немесе бірнеше) электронды-тесік өткелдерін қамтитын құрылғы. Электронды-саңылау өткелі – жартылай өткізгішті кристалдың екі бөлігінің арасындағы жұқа қабат, оның бір бөлігі электронды өткізгіштікке (n-аймақ), ал екінші бөлігі саңылау өткізгіштікке (p-аймақ) ие. Электрондық саңылаулардың ауысуы p-n өтуі деп аталады. 1.11-суретте жазық p-n өтуі бар жартылай өткізгішті диодтың жеңілдетілген құрылымы, символдық кескіні, тікелей токтың бағыты және тікелей кернеудің полярлығы көрсетілген. p аймағына қосылған диодтың сыртқы терминалы (контакті) анод деп аталады. n аймағына қосылған сыртқы түйреуіш катод деп аталады. Терминалдар арасындағы ығысу кернеуі U деп белгіленген.

Диодтар жартылай өткізгіш құрылғылардың тәуелсіз класы болып табылады және кеңінен қолданылады. Сонымен қатар, бір p-n өтуі бар диод көптүйінді құрылғылардың негізі болып табылады – транзисторлар, тиристорлар және т.б.



1.11-сурет. Жартылай өткізгіш диод: а) жеңілдетілген құрылым; б) таңба

Зерттеу салаларына шолу

Диодтың екі сыртқы терминалы болғандықтан, оның жұмысын үш режим үшін қарастырған жөн:

- 1. терминалдарда ығысу кернеуі $U=0$ жок;
- 2. терминалдарда тікелей ығысу кернеуі $U>0$;
- 3. терминалдарда кері ығысу кернеуі $U<0$.

Жартылай өткізгіштерде екі негізгі тасымалдаушы механизм бар:

- заряд тасымалдаушылардың диффузиясы;
- сыртқы электр өрісінің әсерінен заряд тасымалдаушылардың дрейфі.

Заряд тасымалдаушылардың диффузиясы – кристалдағы тасымалдаушылардың олардың концентрациясының төмендеуіне бағытталған бағытталған қозғалысы. Диффузия процесі бүкіл кристалдық көлем бойынша тепе-тең емес заряд тасымалдаушылардың біркелкі таралуының теңестірілуіне әкеледі.

Заряд тасымалдаушылардың дрейфі – сыртқы электр өрісінің әсерінен заряд тасымалдаушылардың реттелген қозғалысы. Заряд тасымалдаушылардың дрейфі нәтижесінде пайда болатын электр тогы дрейф деп аталады.

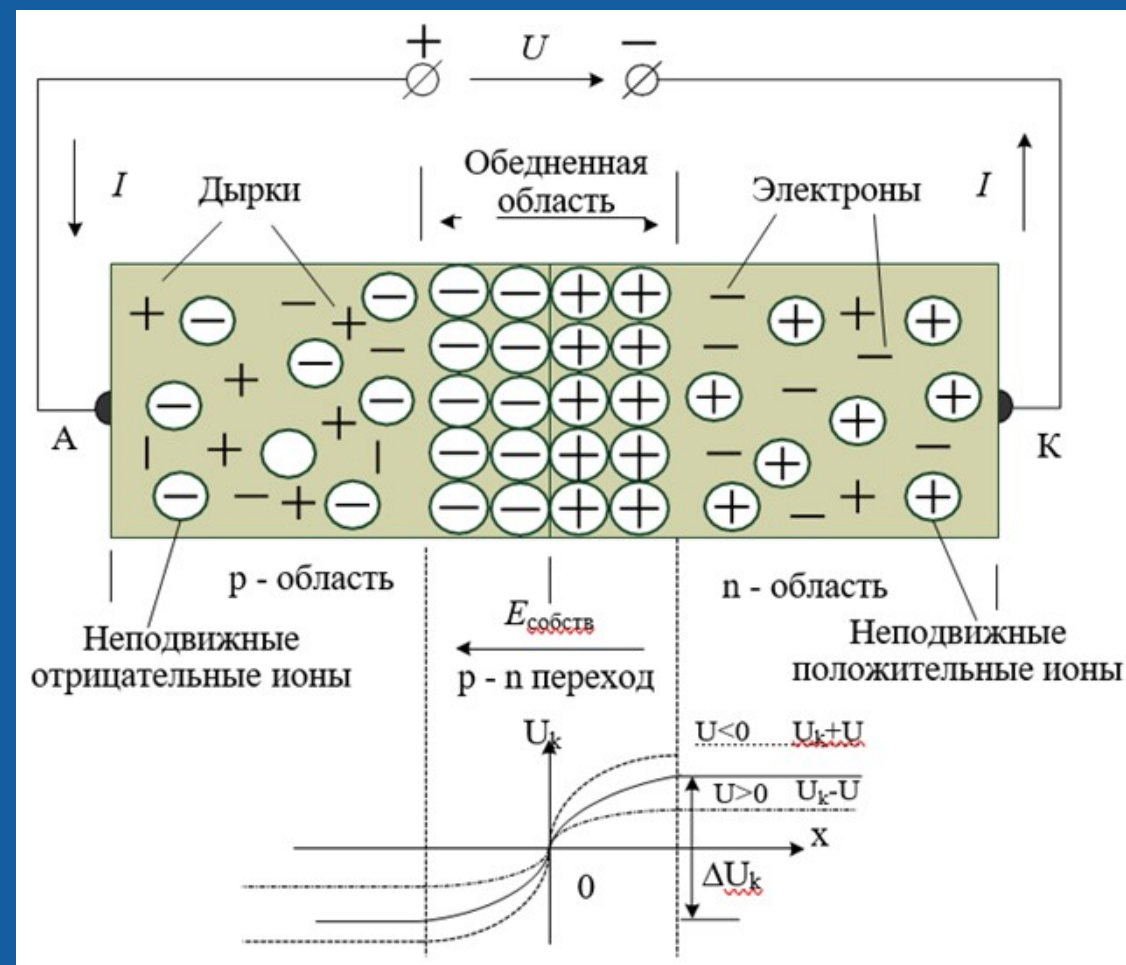
Ауыспалы токтың тығыздығы j қатынасымен анықталады:

$$J=\sigma E \quad (1.2)$$

мұндағы σ меншікті өткізгіштік, E – электр өрісінің кернеулігі. Жартылай өткізгіште тасымалдаушылардың екі түрі болғандықтан, өткізгіштік екі құрамдас бөліктен тұрады (электрондық және тесік):

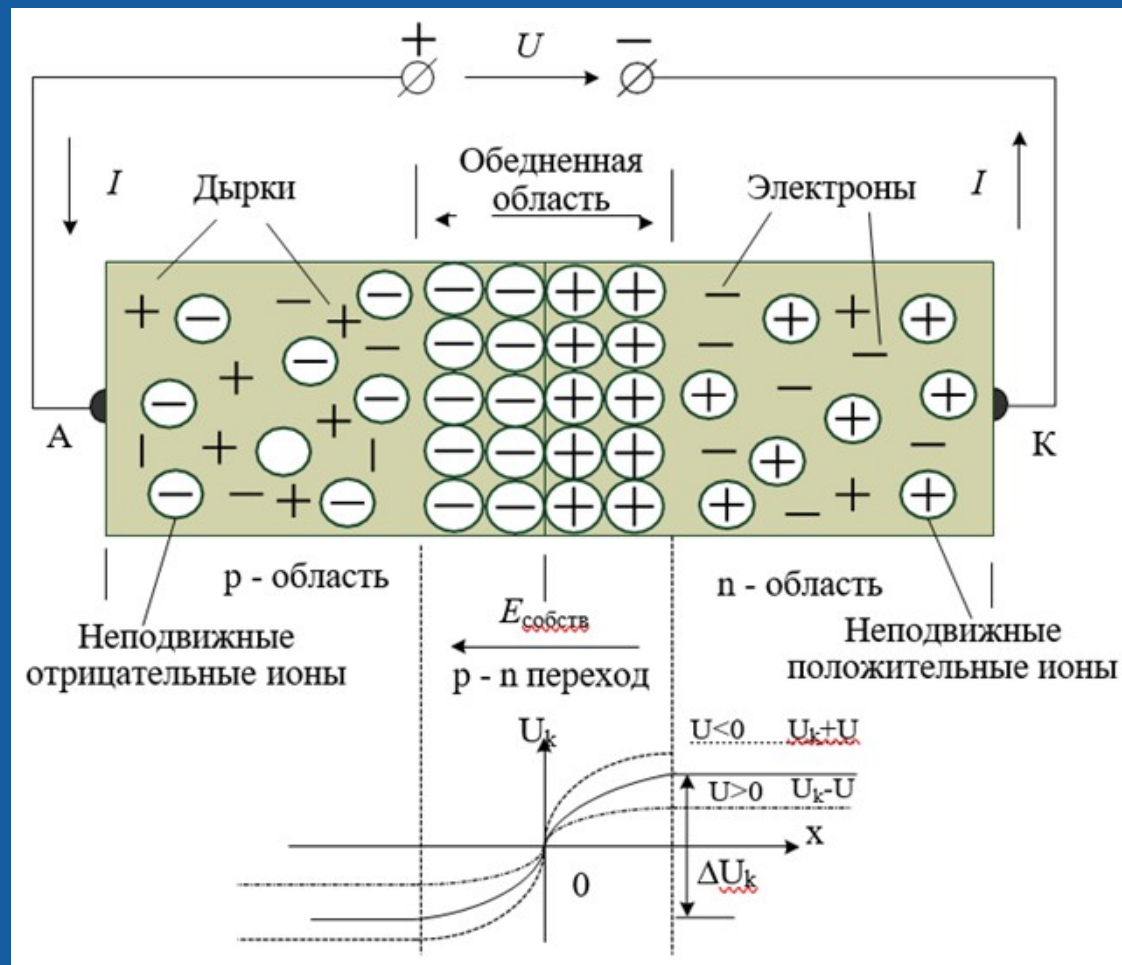
$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \quad (1.3)$$

P-N



1.12-сурет. р–п түйісуінің шартты бейнесі

р–п түйісуінің шартты бейнесі 1.12-суретте көрсетілген. Әртүрлі типтегі жартылай өткізгіш материалдардың контактілі қосылуынан кейін контакт аймағында электрондар мен саңылаулардың рекомбинациясы жүреді. р қабатындағы саңылаулардың концентрациясы n қабатына қарағанда әлдеқайда жоғары болғандықтан, кейбір кмтіктер р қабатынан n қабатына диффузияланады. р диффузиялық ток пайда болады. Бұл жағдайда шекараға жақын n қабатында тепе-теңдік шарты орындалғанша электрондармен қайта қосылатын артық кемтіктер болады.



1.12-сурет. р–n түйісуінің шартты бейнесі

Сәйкесінше бұл аймақта бос электрондардың концентрациясы төмендейді және донор атомдарының компенсацияланбаған оң зарядтары пайда болады. Бұл кезде электрондардың n-аймақтан р-аймаққа диффузиясы басталып, $I_{диф}$ диффузиялық ток пайда болады. Шекараның сол жағында акцепторлық атомдардың компенсацияланбаған теріс зарядтары пайда болады, өйткені кейбір кмтіктер р қабатына ауысқан.

Нәтижесінде р- және n-аймақтарының шекарасында кеңестіктігі зарядтардың қос электрлік қабаты пайда болады. Пайда болған кеңістік зарядтарының облысы р–n ауысу аймағы деп аталады. Оның екі бөлігінде де жылжымалы тасымалдаушылардың концентрациясы күрт төмендегендіктен, бұл аймақ таусылған немесе таусылған қабат деп те аталады.

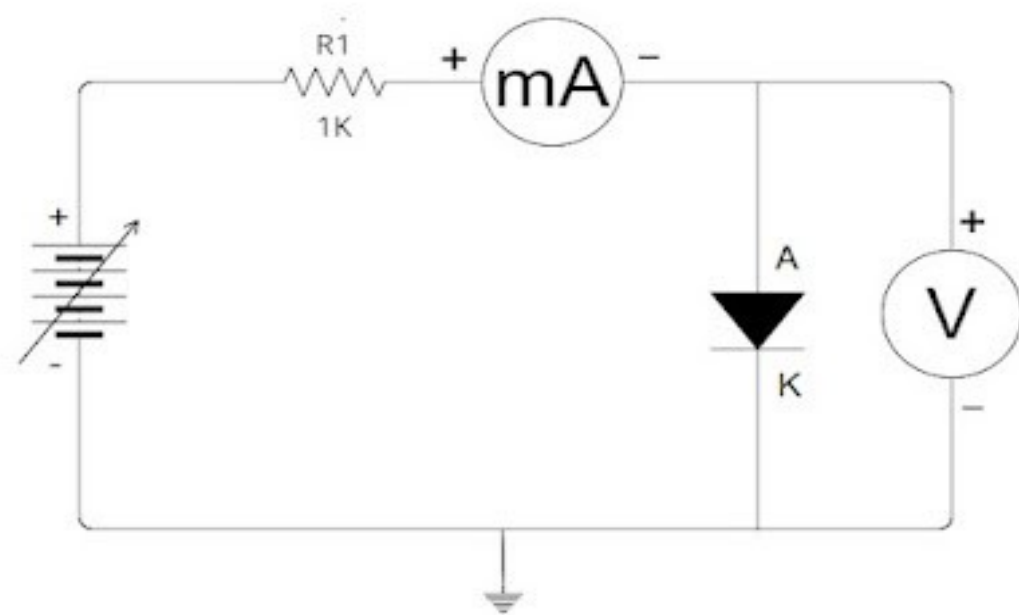
Қос электрлік қабаттың өрісі n - аймағына саңылаулардың, ал электрондардың р - аймағына одан әрі таралуын болдырмайтын потенциалдық кедергі жасайды.

Екі аймақтың интерфейсінде меншікті электр өрісі E_{self} пайда болады, кеңістік зарядының белгісі күрт өзгереді, ψ_k контактілі потенциалдар айырымы пайда болады, меншікті электр өрісінің қарқындылығы максималды болады және ΔU_k потенциалдық кедергі жасайды, диффузиялық токтың одан әрі өтуіне жол бермеу.

Егер кері теріс кернеу U_0 р-n өткелінің А және К сыртқы контактілеріне қосылса, онда жартылай өткізгіштегі осы кернеуден пайда болған сыртқы электр өрісі E_{own} -ға дейін қосылады. , потенциалдық тосқауыл артады, р-n өтуі жабық күйінде қалады және сыртқы тізбекте шамалы кері ток болады.

$I_{обр}$, азшылық тасымалдаушылардың диффузиялық тогы әсерінен туындаған және қанығу тогы I_s деп аталады.

Жартылай өткізгішті диодтың ток кернеуінің сипаттамасы



1.14-сурет. Диодтың ток кернеуінің сипаттамаларын өлшеу схемасы және диодтардың сыртқы түрі

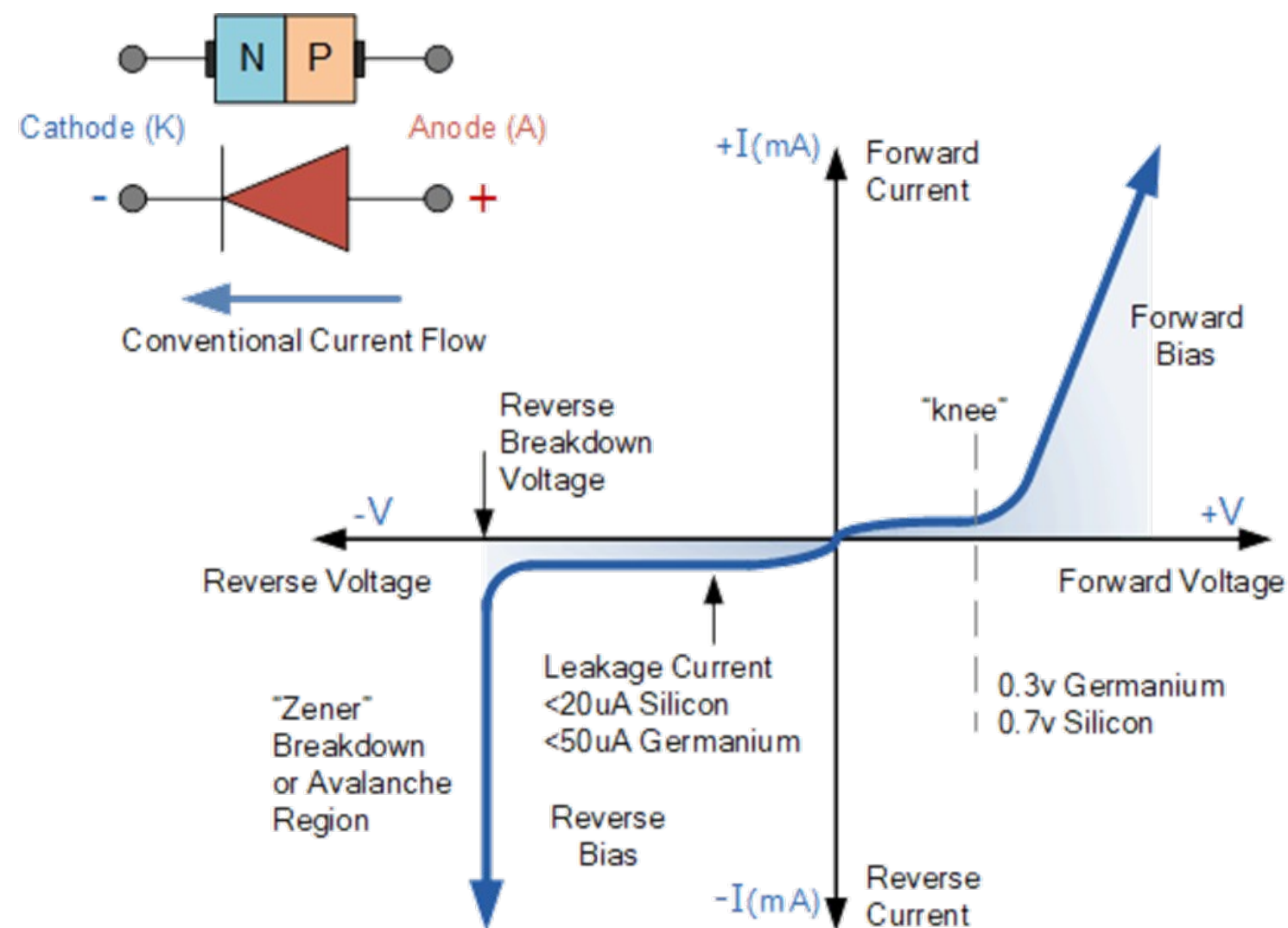
Ток кернеуінің сипаттамасы (CVC) - диод арқылы өтетін токтың ондағы кернеуге тәуелділігі. Ток-кернеу сипаттамасын тәжірибе жүзінде өлшеу үшін 1.14-суреттегі тізбекті қолдануға болады. R кедергісі диодты шамадан тыс токтан қорғау үшін таңдалады.

Өндірістік кремний жартылай өткізгіш диодтардың бірінің ток кернеуінің сипаттамасы 1.15-суретте көрсетілген. Ток кернеуінің сипаттамасы сызықты емес және екі аймақтан тұрады: тікелей кернеу аймағы және кері кернеу аймағы.

Тура кернеу аймағында диод шекті кернеуде $U_p \approx 0,5 - 0,7$ В ашылады және диод тогы күрт артады. Ашық диодтағы тікелей кернеу, әдетте, кремний диод үшін $0,6 - 0,7$ В, германий диод үшін $0,2 - 0,4$ В. Диодтың максималды тікелей тогы оның техникалық сипаттамаларында көрсетілген.

Диодтар төмен ($0,3$ Вт), орташа (10 Вт-қа дейін) және жоғары қуатта (>10 Вт) болады.

Төмен қуатты диодтар үшін I_{pr} макс $50-100$ мА. Қуатты диодтар үшін тікелей ток ондаған амперге жетеді.



Кері кернеу р-п өткелінің бұзылу кернеуімен шектеледі. Көшкіннің бұзылуы кезінде жылжымалы заряд тасымалдаушылардың саны күрт артады, р-п өтуі арқылы ток шексіз артады, ал ондағы кернеу өзгеріссіз қалады. Бұл кернеуді тұрақтандыру үшін қолданылады. Көшкіннің бұзылуы қайтымды жартылай өткізгіштің қасиеттері кернеу жойылғаннан кейін қалпына келеді. Дегенмен, көшкіннің бұзылуынан кейін термиялық бұзылулар орын алуы мүмкін, бұл жартылай өткізгішті бұзады.

Кәдімгі диодтар үшін максималды кері кернеу $U_{rev \max} - 100 \text{ В}$. Жоғары кернеулі диодтар бірнеше жүз вольтты ең жоғары кері кернеуге ие болуы мүмкін.

Жабық күйде кері кернеу аймағында р-п өтуі арқылы шағын ток I_{rev} өтеді, шамамен бірнеше микроамперден аспайтын қанығу тогы I_S -ге тең.

А жұмыс нүктесінің жанында (демалу нүктесі) диод статикалық кедергімен сипатталады

1.15-сурет. Жартылай өткізгішті диодтың ток кернеуінің сипаттамасы

Диодтың кристалдары арасында аз сыйымдылық болуы сигналдың жоғары жиілікте бұрмалануын азайтады.

Төмен сыйымдылық жиілік диапазонын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Тез жауап беру уақыты: Диодтың ауысу уақыты өте аз, бұл оның жоғары жиілікте тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Төмен өткізгіштік кедергісі: Бұл жоғары жиілікті сигналдардың өтуін жеңілдетеді және энергия жоғалтуларын азайтады.

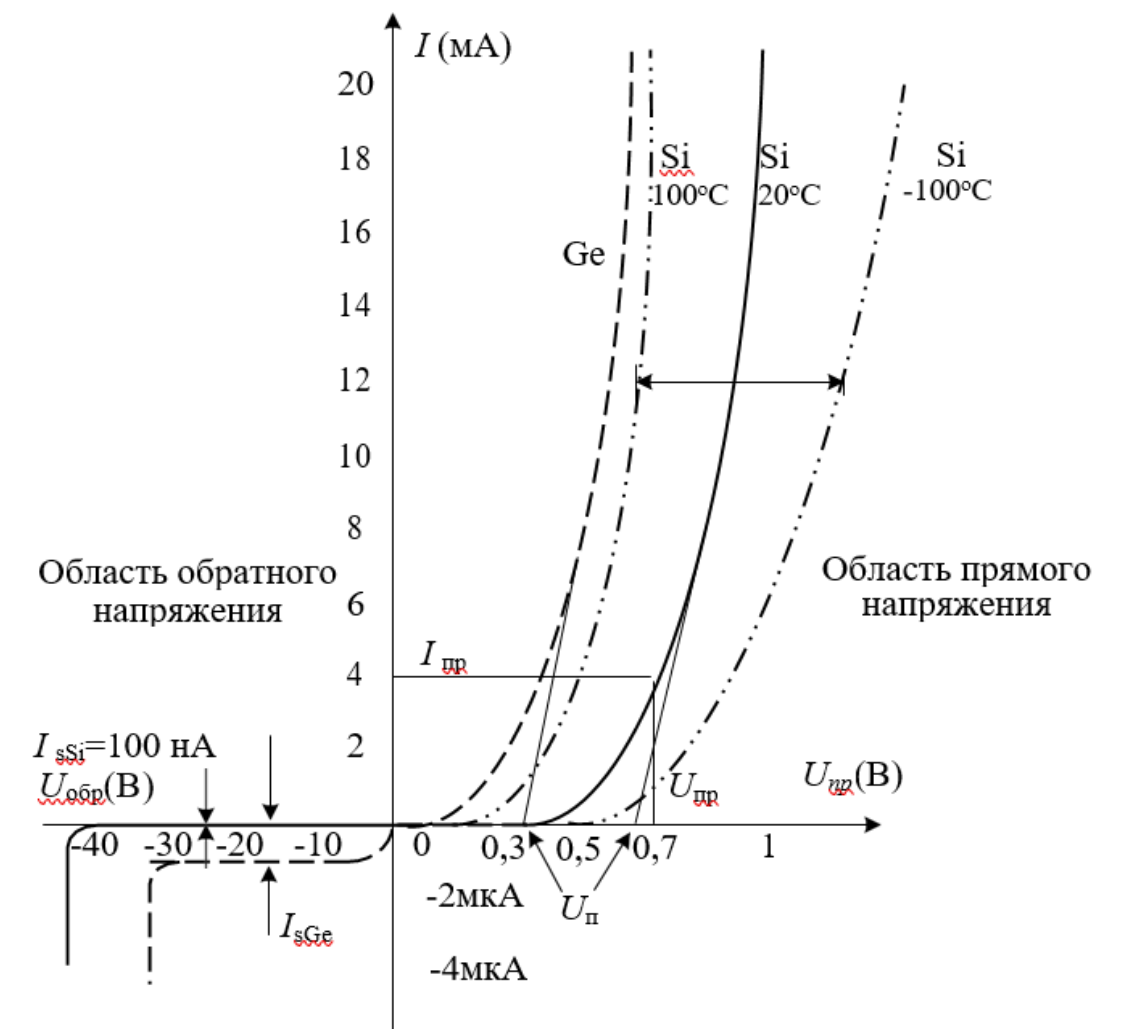
Жоғары жұмыс жиілігі: Кейбір жоғары жиілікті диодтар бірнеше гигагерцке дейінгі жиіліктерде жұмыс істей алады.

Кішігірім өлшем: Жоғары жиілікті диодтардың шағын өлшемдері оларды жинақы құрылғыларда қолдануға мүмкіндік береді.

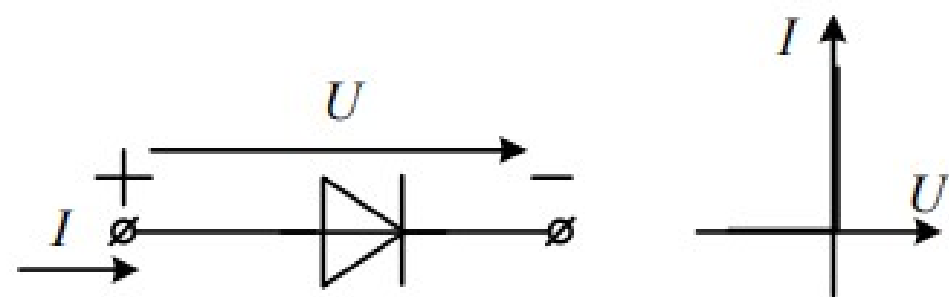
Төменде кремний және германий диодтарының ток-кернеу сипаттамаларын салыстыру

1.16-суретте кремний және германий диодының ток кернеуінің сипаттамалары көрсетілген. Германий диод жоғары $U_{\Pi} \approx 0,3\text{В}$ шекті кернеуде ашылады. $I_{s\text{Ge}}$ германий диодының кері тогы $I_{s\text{Si}}$ кремний диодының кері тогынан бірнеше микроамперден он микроамперге дейін ондаған есе жоғары болуы мүмкін.

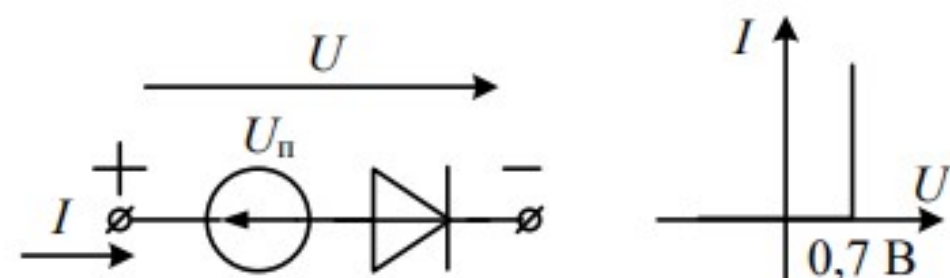
Диодтардың ток кернеуінің сипаттамалары температураға өте тәуелді. Тікелей кернеу аймағындағы сызықшалы графиктер $+100^\circ\text{C}$ және -100°C температуралардағы кремний диодының ток-кернеу сипаттамаларын көрсетеді. Кері кернеу аймағында температура $+100^\circ\text{C}$ дейін көтерілгенде, кері ток шамамен екі есе артады.



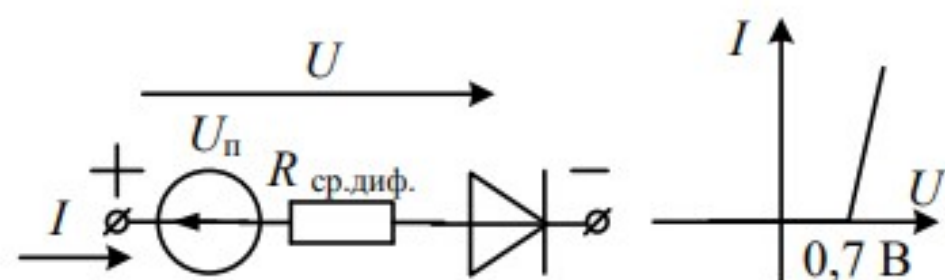
1.16-сурет. Кремний және германий диодтарының ток-кернеу сипаттамаларын және температураға тәуелділіктерін салыстыру



а) Идеал диод және оның ВАС



Ә) Кремний диодының жеңілдетілген эквивалентті схемасы



Б) Диодтың вольт-амперлік сипаттамасын (ВАС) аппроксимациялау үшін

1.17-сурет. Кремний диодының оңайлатылған эквивалентті сұлбаларына арналған суреттер

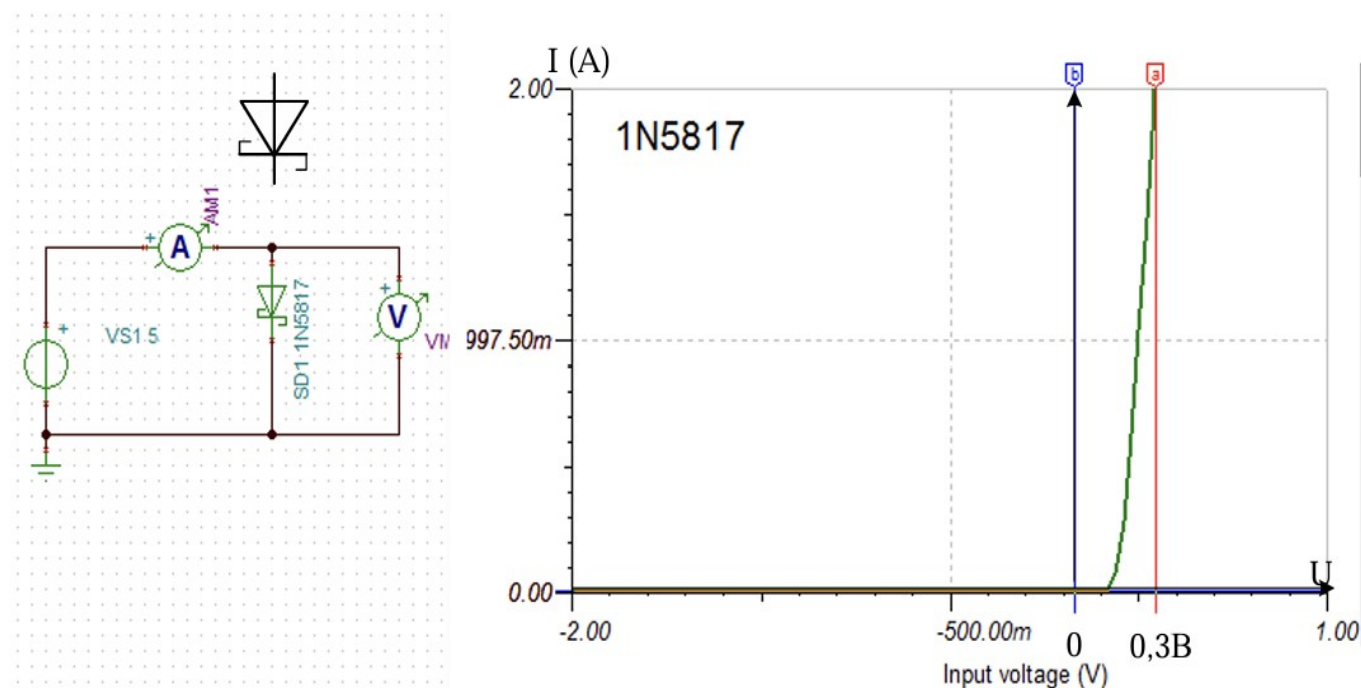
Төмен жиіліктегі электрондық тізбектерді шамамен есептеу үшін біз оңайлатылған эквивалентті схемаларды қолданамыз. Бұл диодтардың жиілік қасиеттерін және температураға тәуелділіктерін ескермейді.

Диодтың вольт-амперлік сипаттамасын аппроксимациялау үшін кесінділермен сызықты (кусочно-линейная) әдіс жиі қолданылады. Бұл әдіс диодтың күрделі ВАС-ын бірнеше сызықты аймақтарға бөлуге және әр аймақты эквивалентті схема арқылы модельдеуге мүмкіндік береді. Мұндай модельдеу диодтың мінез-құлқын талдау мен есептеуді жеңілдетеді.

Диодтың ВАС-ы үш негізгі үш аймаққа бөлінеді:

- о Тура бағыттағы өткізгіштік аймағы (өткізетін күй): Бұл аймақта диод аздап кернеу түскенде ($V_f \approx 0.7V$ кремний диодтары үшін) ток тез артады. $I = (V - V_f) / R_f$ – тура кедергі.
- о Кері бағыттағы бөгеу аймағы (жабық күй): Диод кері кернеуде жабық күйде жұмыс істейді, және тек аздаған кері ток (I_r) өтеді. $I = I_r$ кернеу шамамен тұрақты деп есептеледі.
- о Тесіп өту аймағы (кері тесіп өту): Егер кері кернеу диодтың тесіп өту кернеуінен (V_{br}). $I = (V - V_{br}) / R_{br}$ асса, ток күрт артады. Бұл аймақ кері бағыттағы жоғары өткізгіштікпен сипатталады.

Жартылай өткізгіш диодтардың арнайы түрлері



1.24-сурет. Белгілеу, модельдеу схемасы және шоттки диодының вольт амперлік сипаттамасы сипаттамасы

Жартылай өткізгіш құрылғылардың тұтас сериясы әзірленді және қолданылды, онда р-п өткелінің арнайы қасиеттері қолданылады, бұл сізге құрылғылардың жаңа маңызды қасиеттерін көрсетеді. Кейбіреулерін қысқаша қарастырайық олардың ішінде.

Шоттки Диодтары

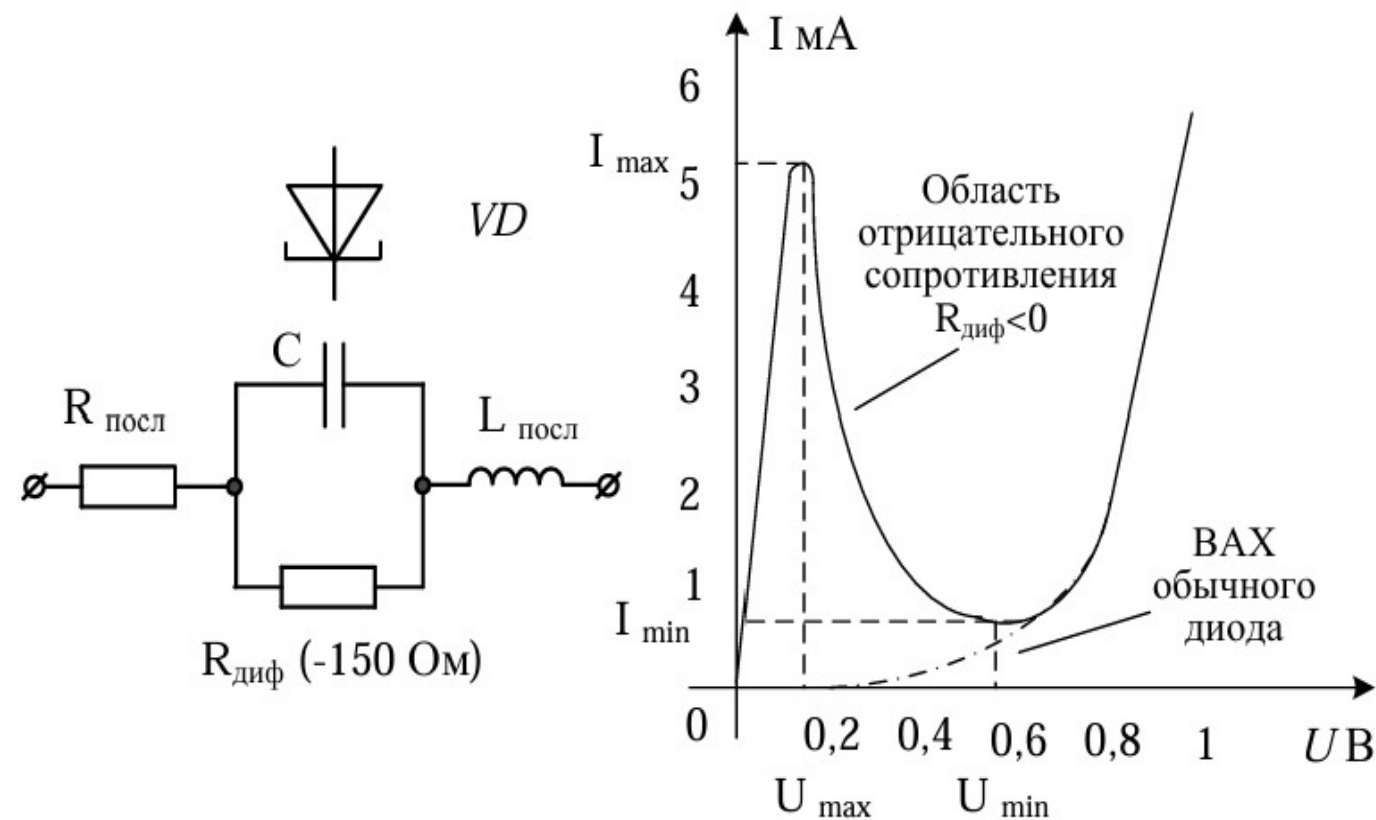
Шоттки диодтары әдеттегі р-п ауысу диодтарынан айырмашылығы, металл (Au, Al, Ag, Pt және т.б.) мен жартылай өткізгіш (Si, GaAs) арасындағы түйіспеге негізделген. Бұл түйіспеде потенциал тосқауылы пайда болып, сыртқы кернеу әсерінен өзгеріп, ток ағынын реттейді. Диодта негізгі емес тасымалдаушылардың әсері аз, ал ток негізінен негізгі заряд тасымалдаушылар арқылы өтеді, бұл оның р-п ауысу диодтарына қарағанда төмен ауысу кедергісіне және жоғары жиілікте (20 ГГц-ке дейін) жұмыс істеуіне мүмкіндік береді. Шоттки диодтары төмен инерциясымен, төмен шуы мен өндірісінің қарапайымдылығымен ерекшеленеді, сондай-ақ интегралды схемалармен үйлесімділігі жоғары. Төмен өтпелі кедергісі үлкен токтарды (50-100 A) өткізуге мүмкіндік беріп, жоғары тиімділікпен жұмыс істеуді қамтамасыз етеді. Мысалы, тура бағытта 0,3 В кернеуде ток 3 А-ға дейін жетуі мүмкін.

Жартылай өткізгіш диодтардың арнайы түрлері

Туннель диодтары

Туннель диоды-құрамында р-п бар жартылай өткізгіш диод құлыптау қабатының қалыңдығы өте аз ауысу. Туннель әрекеті (германия-теріс) ГО диод электрондардың тар потенциал арқылы өтуіне негізделген туннель әсерінің арқасында тосқауыл. Туннель эффектiсi микробөлшектің ықтимал тосқауыл арқылы енуі, егер оның толық энергиясы тосқауылдың биіктігінен аз. Туннель диодтары жасалды GE және GaAs негізінде құйылады. Құлыптау қабатының қалыңдығы 5-15 нм құрайды.

Егер туннель диодына аздап тікелей кернеу берілсе, потенциалды тосқауылдың биіктігі төмендейді, Электрон потенциалды тосқауыл арқылы туннельденетін N – аймақтағы Суқұйғыштар р - облысының валенттік аймағының рұқсат етілген бос энергетикалық деңгейлері сти. Туннель тогы алдымен максимумға жетеді, содан кейін аймақтың қабаттасу дәрежесі төмендеген сайын өткізіледі N – облыс және Р-облыс валенттік аймағы. U_{min} кернеуінен бастап, бұл аймақтар қабаттасуды тоқтатады, туннель тогы тоқтайды және ағып кетеді тек диффузиялық ток диффузиялық I . Туннель диоды әдеттегідей болады диодқа тікелей бағытта. Нәтижесінде вольтампер сипаты туннель диодының теристикасында құлаған аймақ теріс пайда болады го дифференциалды кедергі (сурет.1.25).



1.25-сурет. Туннель диодының белгіленуі, эквивалентті схема және Вольт Ампер сипаттамасы

Максималды туннель тогының минимумға қатынасы

$$\frac{I_{max}}{I_{min}} \approx 10$$

$$U_{max} \approx 0,1V$$

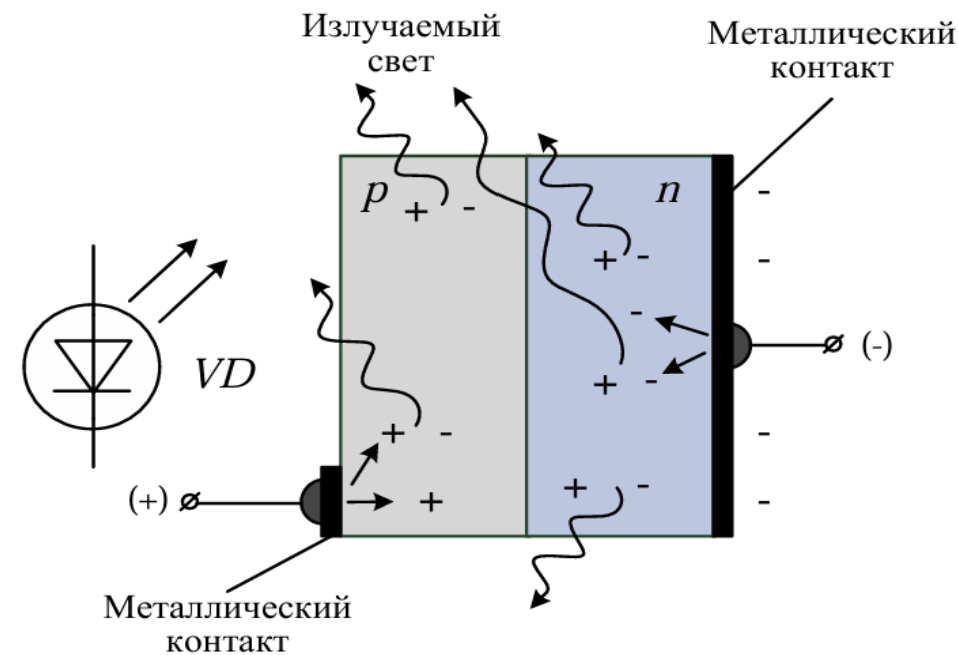
$$U_{min} \approx 0,6V$$

Токтың максимумына сәйкес келетін кернеу,

Токтың максимумына сәйкес келетін кернеу

Жартылай өткізгіш диодтардың арнайы түрлері

Светодиодтар



1.29-сурет. Жарықдиодты электролюминесценция процесі және оның белгіленуі

Жарық диодтары p-n болатын жартылай өткізгіш диодтар деп аталады электр тогының өтуі кезінде ауысу оптикалық сәулеленуді тудырады спектрдің инфрақызыл, көрінетін немесе ультракүлгін аймағында емдеу.

Кез-келген p-n ауысуында электрондар мен кмтіктердің рекомбинациясы жүреді рок. Бұл рекомбинация еркін байланыссыз энергияның болуын талап етеді Электрон басқа күйге ауыстырылды. Барлық p-n ауысуларында энергия жылу түрінде, ал кейбіреулерінде фотондар түрінде болады сәулелену. Галлий арсенид фосфиді (GaP), фосфид сияқты материалдарда галлий (GaP), кремний карбиді (SiC) Жарық энергиясының фотондарының саны жеткілікті көрінетін жарық көзін жасау үшін керемет.

Электр көзі қолданылған кезде жарық шығару процесі энергия электролюминесценция деп аталады (сурет.1.29).

Қорытынды:

Бұл дәрісте жартылай өткізгішті диодтың табиғаты мен жұмыс істеу принциптері жан-жақты қарастырылды. Алдымен диодтың негізгі құрылымы мен $p-n$ өткеліндегі физикалық құбылыстар – диффузия мен дрейф үрдістері, кеңістік заряды мен потенциалдық тосқауылдың пайда болуы талданды. Диодтың тікелей және кері ығысу режимдеріндегі жұмыс ерекшеліктері, оның ток–кернеу сипаттамасы мен Эберс–Молл тендеуі арқылы сипатталатын шамалар арасындағы байланыс түсіндірілді. Сонымен қатар, диодтың статикалық және дифференциалдық кедергілері, кедергілік және диффузиялық сыйымдылықтарының пайда болу шарттары қарастырылып, кремний және германий диодтарының айырмашылықтары аталды. Жоғары жиілікті диодтардың ерекшеліктері, эквивалентті схемалар құру мақсаты, арнайы диодтардың түрлері мен қолданылу салалары қамтылды. Шоттки, туннель, варикап, жарықдиод, фотодиод және Зенер диоды сияқты арнайы диодтардың жұмыс принциптері жеке-жеке талданды. Әсіресе, Зенер диодының тұрақтандырудағы рөлі, жарықдиод пен фотодиодтың салыстырмалы принциптері, сондай-ақ туннель диодындағы теріс дифференциалды кедергі құбылысы маңызды ерекшеліктер ретінде атап өтілді. Практикалық тұрғыда диодтың вольт–ампер сипаттамасын графикалық әдіспен анықтау, диод пен резистордан құралған тізбектің жұмыс нүктесін табу жолдары және компьютерлік бағдарламалар арқылы диодты модельдеу мәселелері көрсетілді. Жалпы, диодтардың артықшылықтары мен шектеулерін талдау арқылы олардың қазіргі электроникадағы орны мен маңызы айқындалды. Осылайша, дәрістің негізгі мақсаты – жартылай өткізгішті диодтардың теориялық негіздері мен қолдану аясы туралы толық түсінік қалыптастыру болды.

Қайталау сұрақтары:

1. Жартылай өткізгішті диод дегеніміз не? Оның негізгі бөліктерін атаңыз.
2. $p-n$ өткелінде қандай физикалық процестер жүреді? (диффузия, дрейф).
3. Кеңістік заряды және потенциалдық тосқауыл қалай пайда болады?
4. Тікелей және кері ығысу режимдерінде диод қалай жұмыс істейді?
5. Эберс–Молл теңдеуі қандай шамаларды байланыстырады?
6. Диодтың статикалық және дифференциалдық кедергілерін қалай анықтайды?
7. Диодтың кедергі сыйымдылығы мен диффузиялық сыйымдылығы қандай жағдайда пайда болады?
8. Кремний және германий диодтарының ток–кернеу сипаттамасының айырмашылықтарын атаңыз.
9. Жоғары жиілікті диодтардың ерекшеліктері қандай?
10. Диодтардың эквивалентті схемаларын құрудың мақсаты не?
11. Арнайы диодтарға қандай түрлер жатады және олардың қолданылу салалары қандай?
12. Шоттки диодының $p-n$ диодтан айырмашылығы неде?
13. Туннель диодының теріс дифференциалды кедергі құбылысы қалай түсіндіріледі?
14. Варикап қандай принциппен жұмыс істейді және қайда қолданылады?
15. Жарықдиод пен фотодиодтың физикалық жұмыс принциптерін салыстырыңыз.
16. Зенер диоды кернеу тұрақтандыруда қандай рөл атқарады?
17. Диодтың вольт–ампер сипаттамасын графикалық әдіспен қалай анықтайды?
18. Диод пен резистордан құралған қарапайым тізбектің жұмыс нүктесін қалай табуға болады?
19. Диодты модельдеу үшін қандай компьютерлік бағдарламалар қолданылады?
20. Диодтардың артықшылықтары мен шектеулерін атаңыз.

Назарларыңызға рақмет!