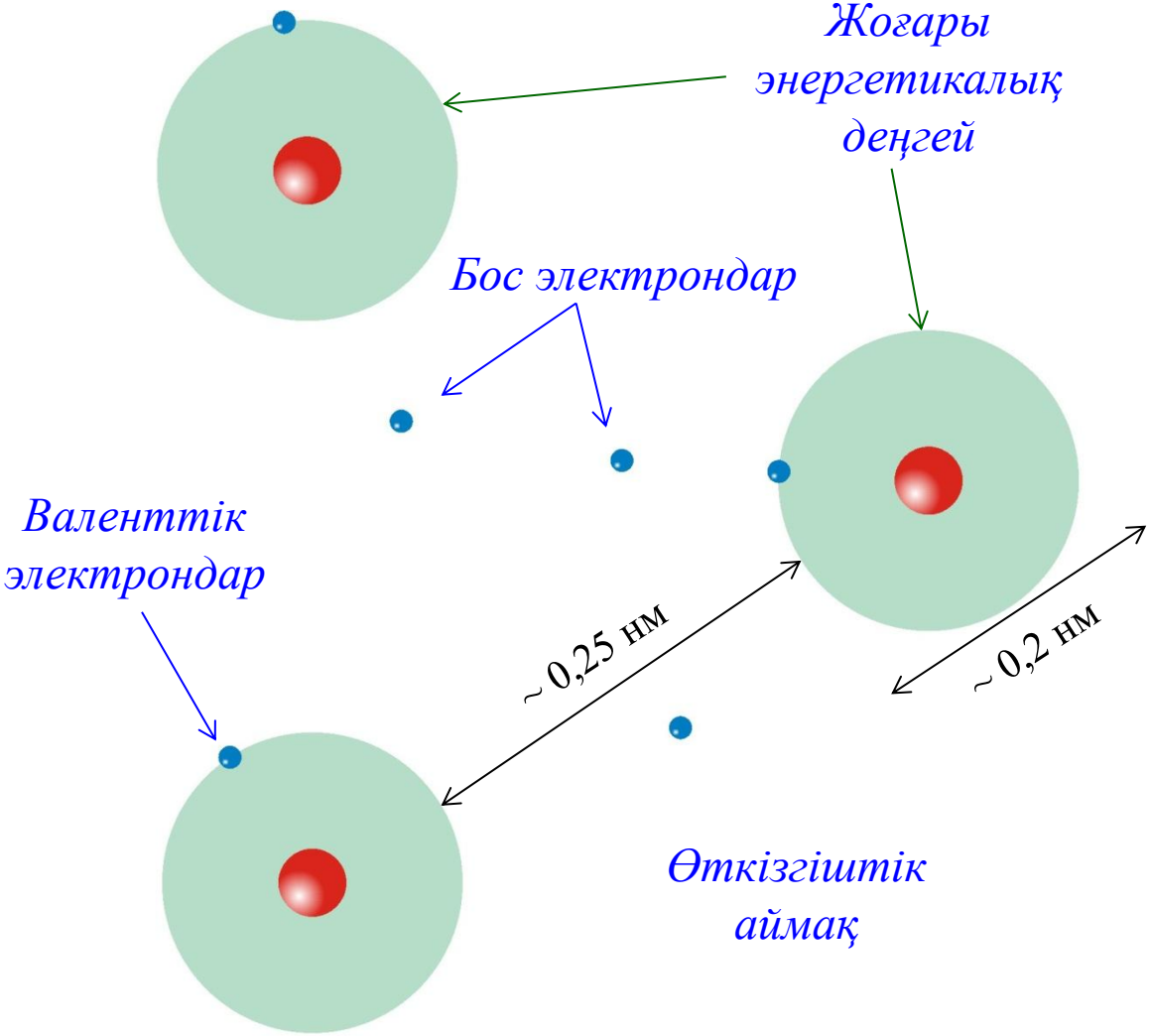
ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

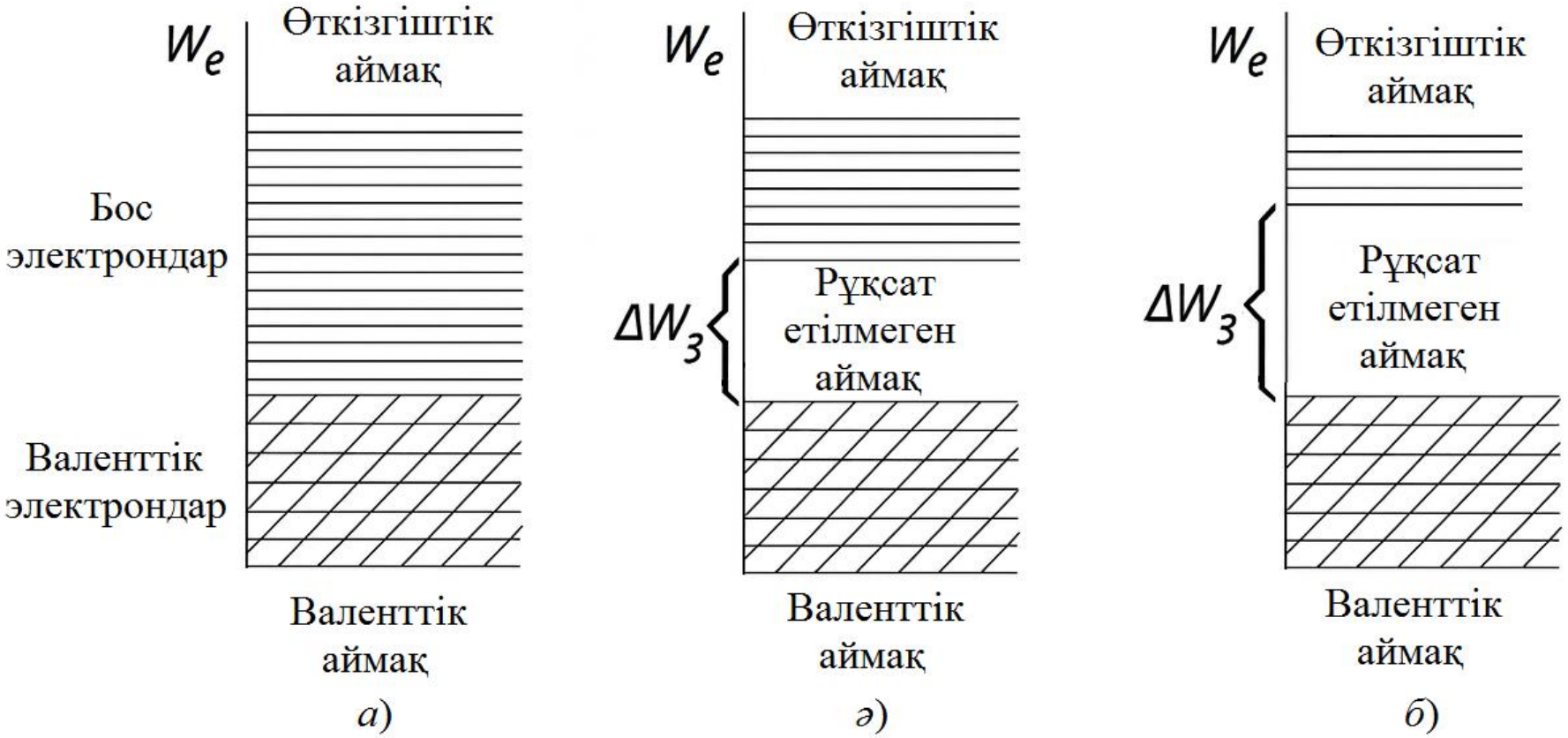
Физикалық электроника негіздері

Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

Атом ядросы маңайында электрондар энергия шамалары дискретті болатын деңгейлерде орналасады



Энергетикалық деңгейлер

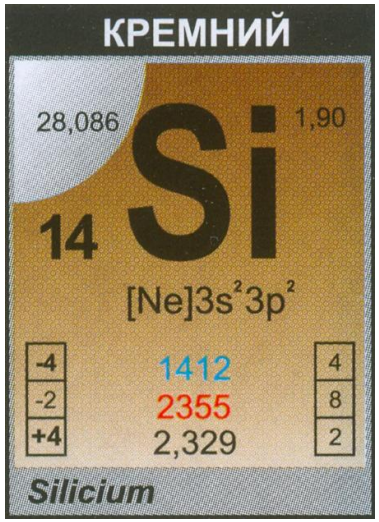


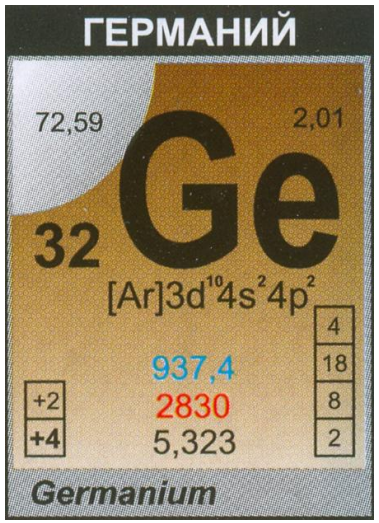
а) өткізгіштер, *ә*) жартылай өткізгіштер $(0{,}01 \leq \Delta W_з \leq 3$ эВ)
б) диэлектриктер $(\Delta W_з > 3$ эВ)

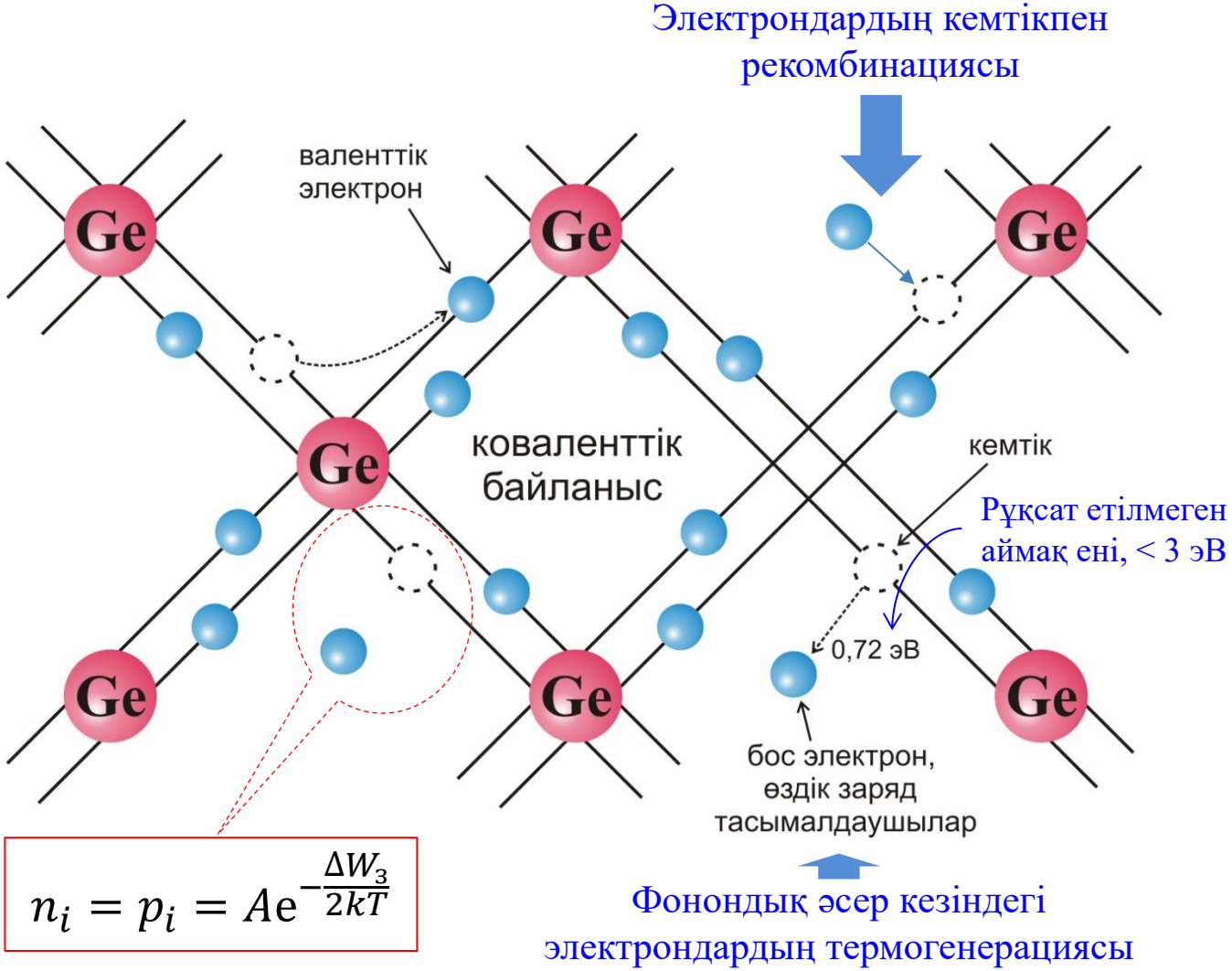
Бір электрон вольт дегеніміз потенциалдар айырымы 1 В болатын электр статикалық өріс кеңістігіндегі белгілі орындар арасында элементар зарядты тасымалдауға қажет энергия. q зарядының тасымалдануы кезіндегі жұмыс qU-ға тең (мұндағы U – потенциалдар айырымы). Элементар заряд $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл болғандықтан: 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Қарапайым таза жартылай өткізгіш материалдар

4 группа элементтері





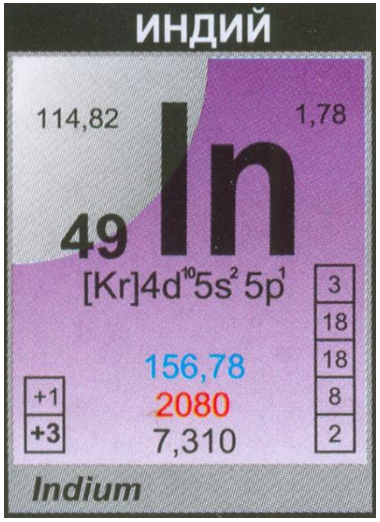


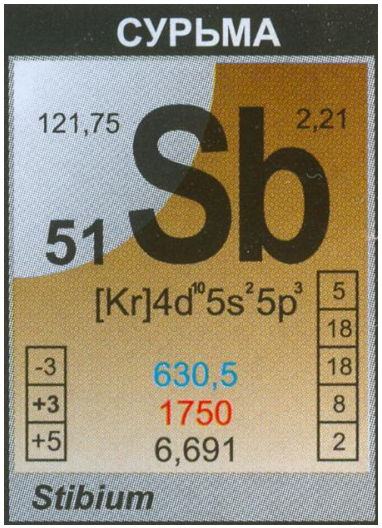
$$n_i = p_i = A\mathrm{e}^{-\frac{\Delta W_3}{2kT}}$$

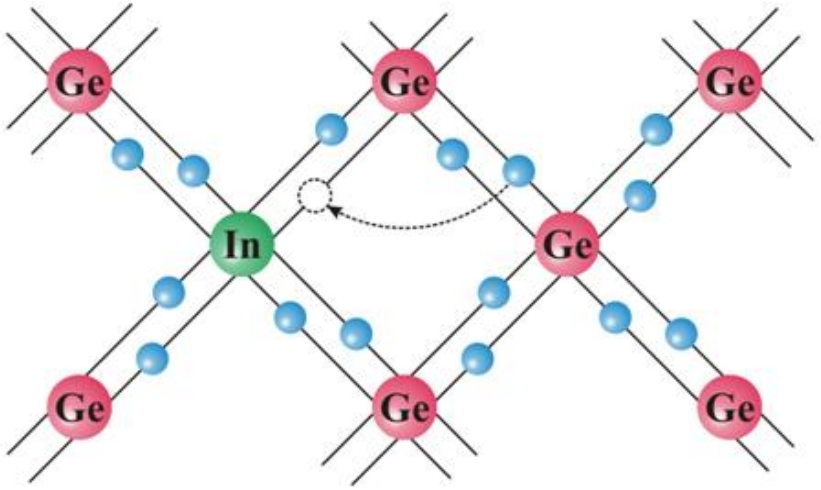
$n_{i(Ge)} = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ – өздік заряд тасымалдаушылардың концентрациясы

Легирленген жартылай өткізгіштер

- n_n, p_p – негізгі заряд тасымалдаушылар концентрациясы
- n_p, p_n – негізгі емес заряд тасымалдаушылар концентрациясы

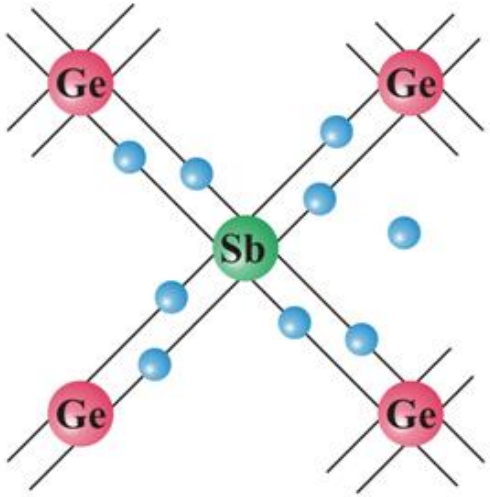






Акцепторлық қоспа (Accept)

1 сурет. $n_p \ll p_p$



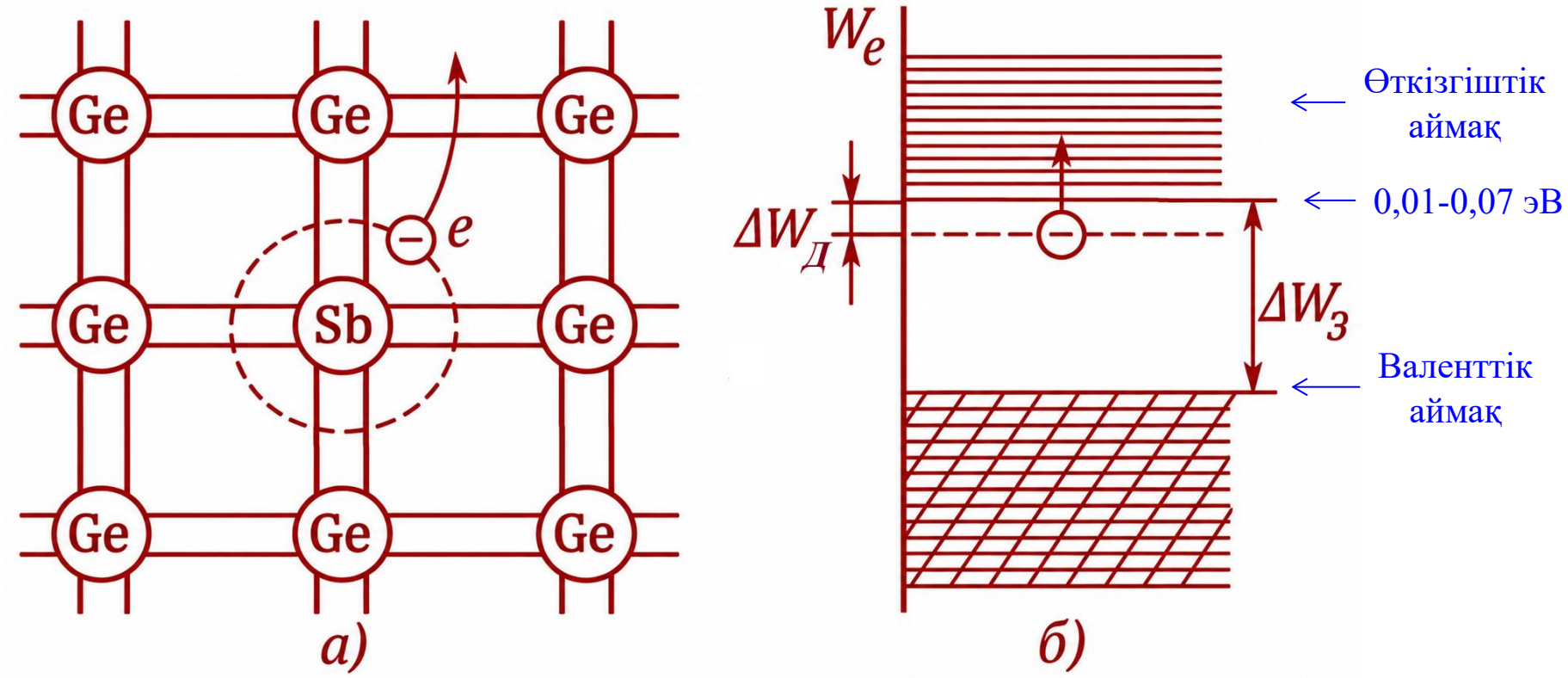
Донорлық қоспа

2 сурет. $n_n \gg p_n$

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i p_i = A^2 e^{-\frac{\Delta W_з}{kT}}$$

A – кристалл табиғатын сипаттайтын коэффициент

n типті кристалда бос электронның пайда болуы



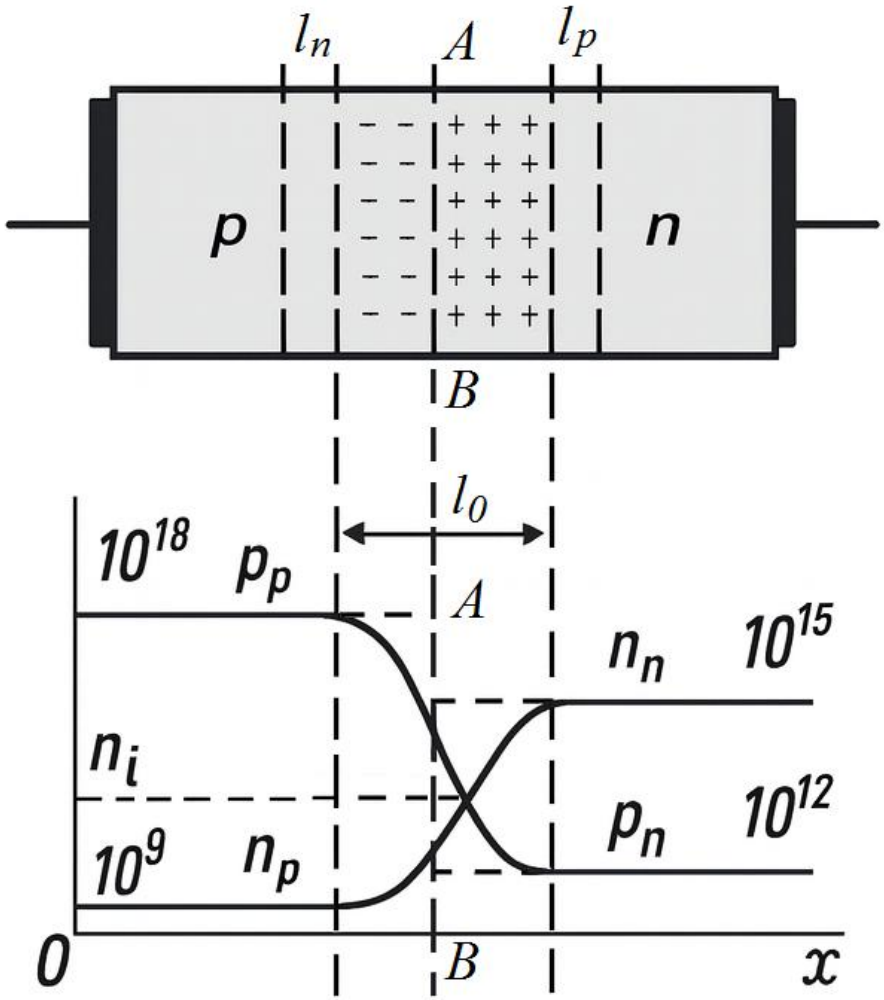
3 сурет.

Донорлық электрон ядромен әлсіз байланысып өткізгіштік аймаққа жақын орналасады, сол себепті болмашы ғана энергия (бөлме температурасы) берілген кезде ол бос электронға айналады. Жалпы жартылай өткізгіштің толық заряды бейтарап.

Зарядтар диффузиясы әсерінен $p-n$ өткелдің пайда болуы

p және *n* алаптарының түйісуі нәтижесінде *p-n* өткелдің пайда болуы

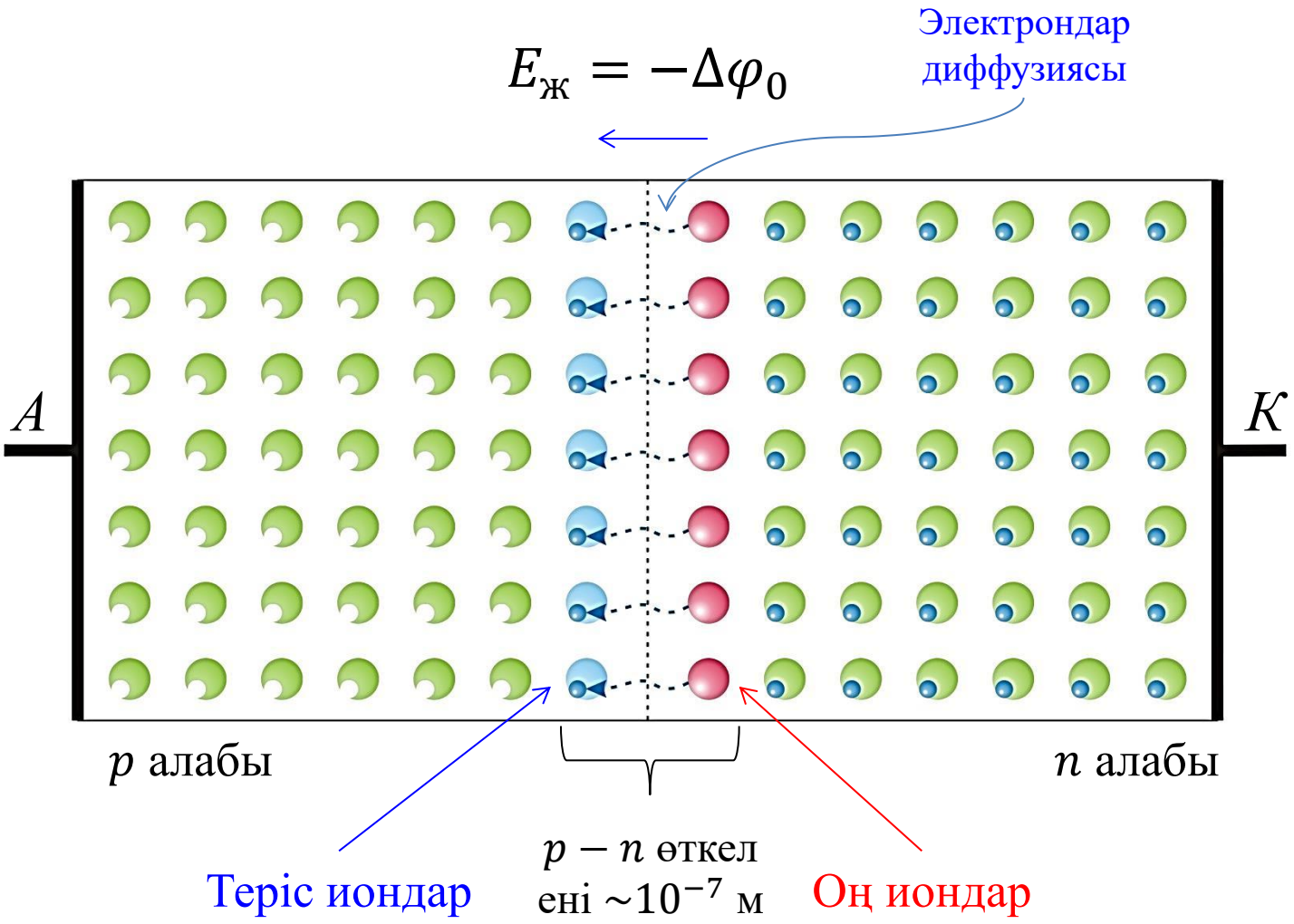
Жартылай өткізгіш ұзындығы (*x*) бойынша заряд концентрацияларының таралуы



4 сурет.

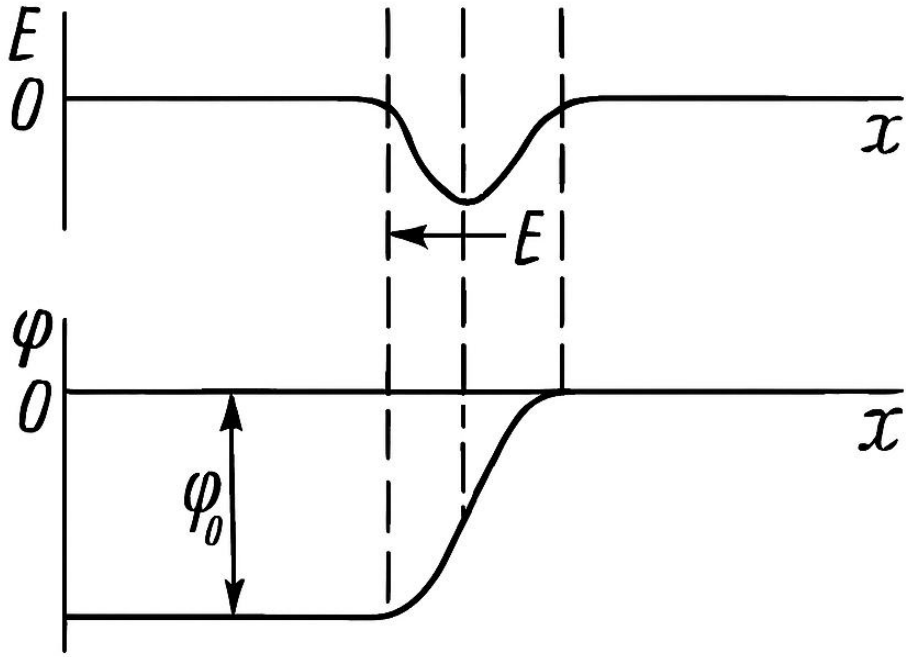
l_0 – *p-n* өткел ені

Зарядтар диффузиясы әсерінен $p-n$ өткелдің пайда болуы



5 сурет.

$p - n$ өткелдегі өріспен потенциалдың таралуы



Потенциалды тосқауыл (тосқауыл потенциалы)

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p}$$

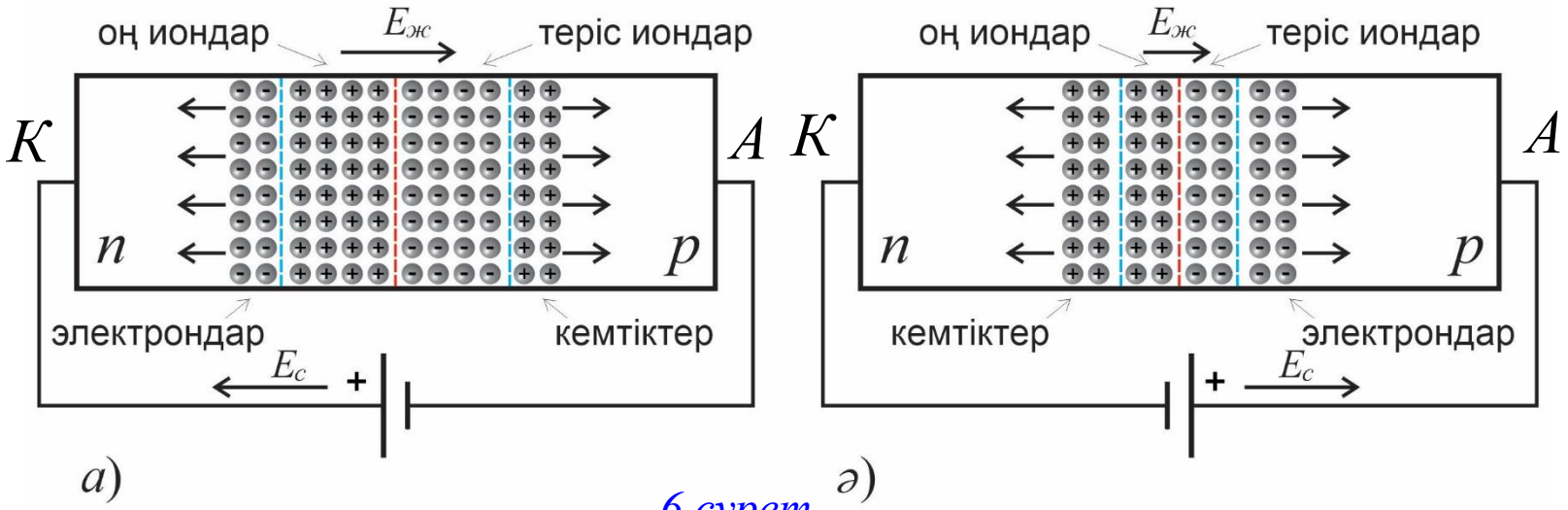
$\varphi_{0(Ge)} = 0{,}3 \div 0{,}5$ В

$\varphi_{0(Si)} = 0{,}6 \div 0{,}8$ В

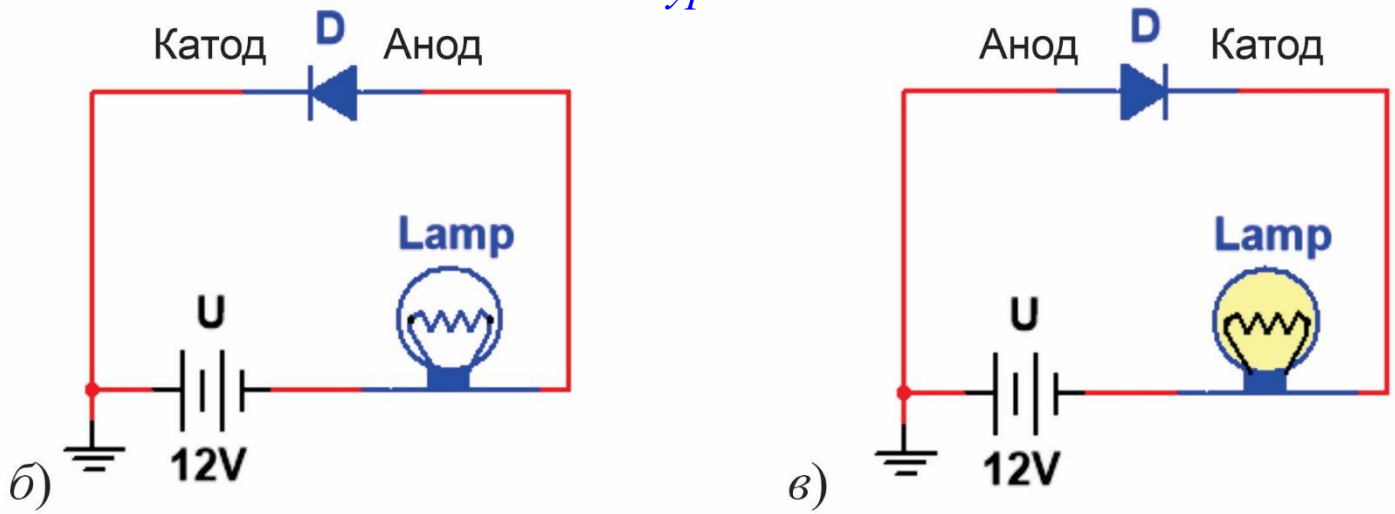
φ_T – жылулық потенциал

Электр тізбегіне жалғанған жартылай өткізгішті диод

$$R_n, R_p \ll R_{p-n}$$



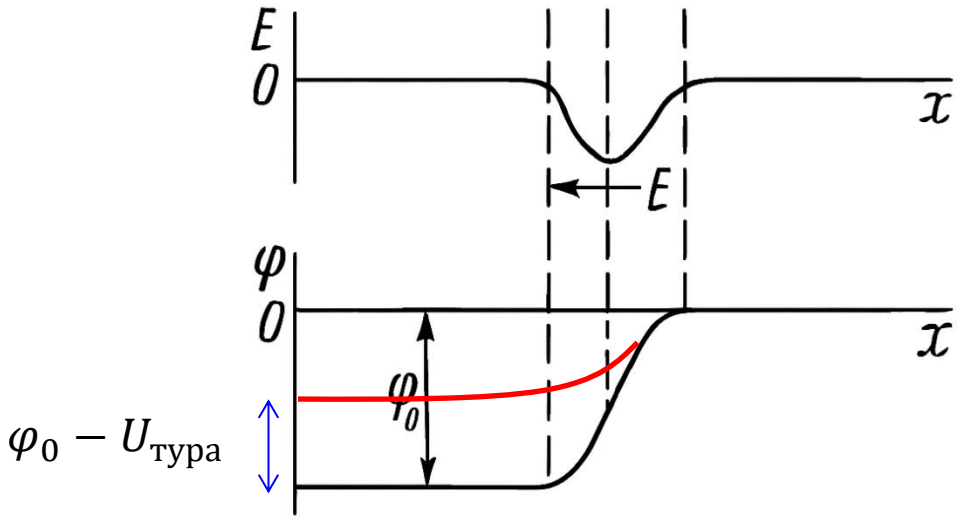
6 сурет



7 сурет

$$E_{қор} = E_ж - E_c$$

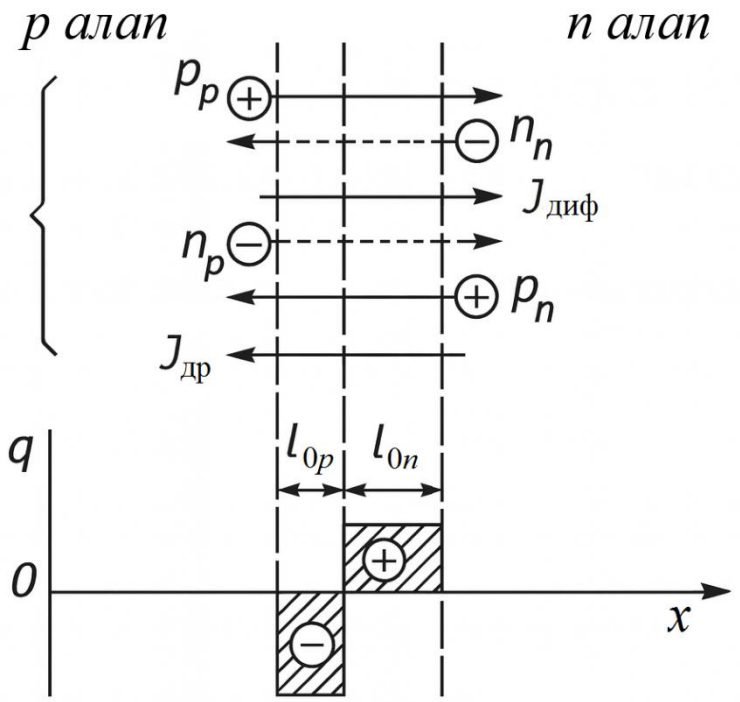
Сыртқы кернеу өрісі әсерінен тосқауыл потенциалының өзгерісі



Сыртқы кернеу өрісі әсерінен $p-n$ өткелдің енсізденуі (тосқауыл потенциалының азаюы) n бөлігінде көбірек жүзеге асады, өйткені оның электр кедергісі жоғары.

$$\varphi_{0(Ge)} = 0{,}3 \div 0{,}5 \text{ В} \qquad \varphi_{0(Si)} = 0{,}6 \div 0{,}8 \text{ В}$$

$p-n$ өткел арқылы токтың ағуы

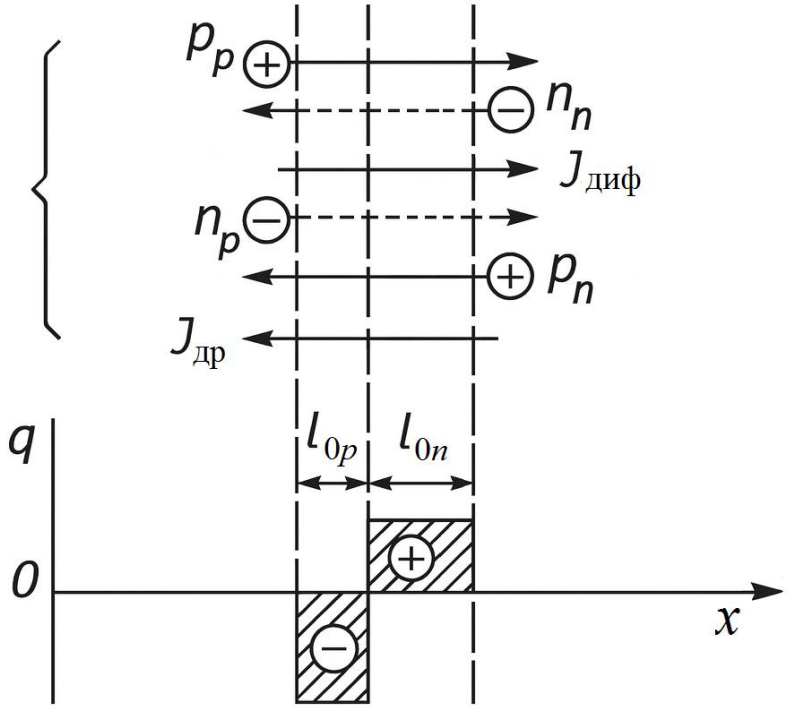


Диффузиялық ток тығыздығы: $J_{диф\,n} = qD_n \frac{dn}{dx}; J_{диф\,p} = -qD_p \frac{dp}{dx}$

Дрейфтік ток тығыздығы: $J_{др\,n} = qn\mu_n E; J_{др\,p} = qp\mu_p E$

D – диффузия коэффициенті; μ – зарядтардың қозғалғыштығы

$p - n$ өткел арқылы токтың ағуы



Заряд тасымалдаушылар өздік, жоғары концентрациялы аймақтан төменгіге өткен кезде таңбалары қарсы зарядтармен рекомбинацияланып, олардың концентрациясы экспоненциалды заңмен төмендей отырып, тепе-теңдікке ұмтылады. Осы уақытта жүрген ара қашықтығы *диффузиялық ұзындық* деп аталады, немесе зарядтардың өмір сүру уақытындағы жүрген жол ұзындығы:

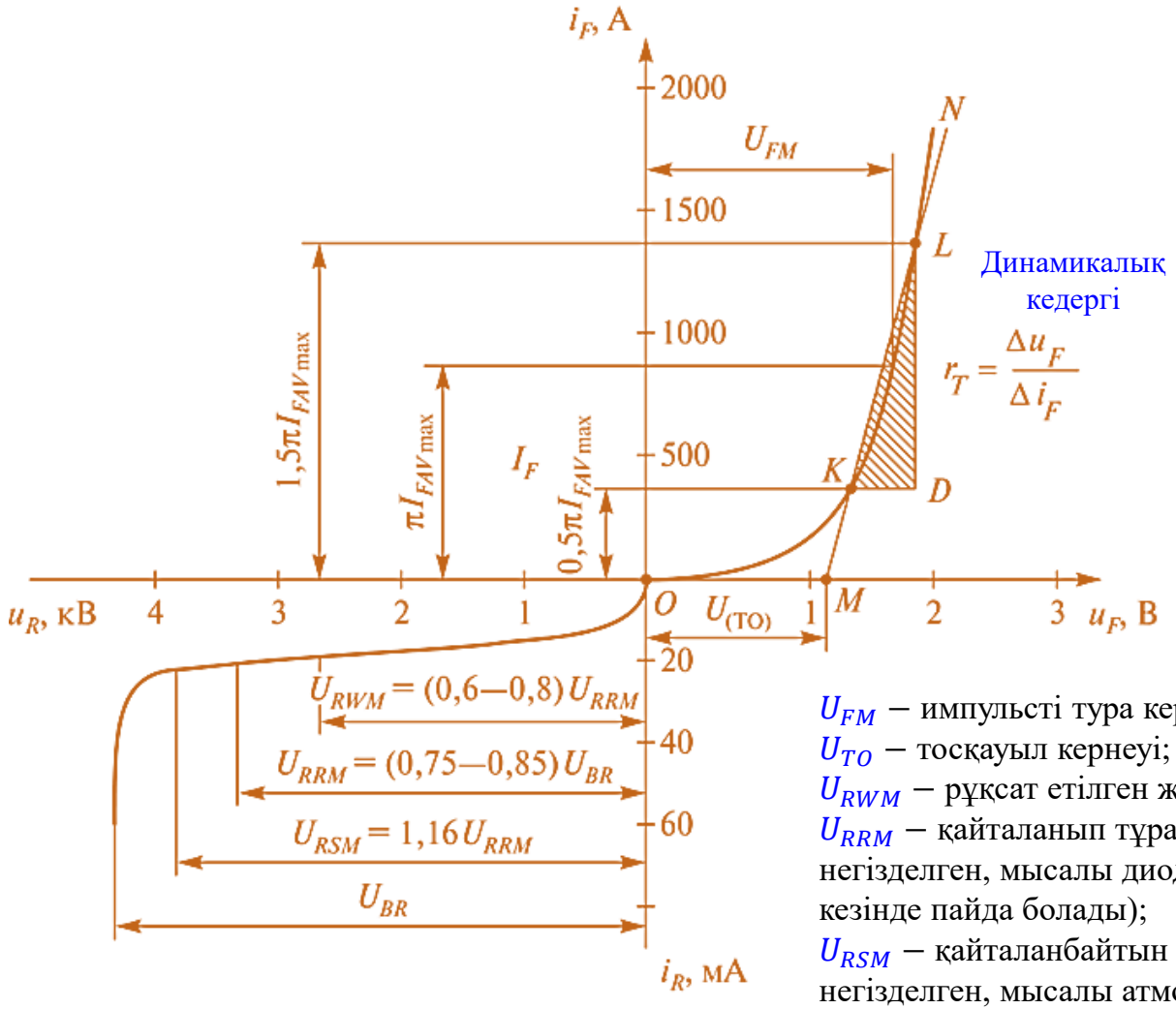
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n};\ L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

l_0 – көлемдік заряд қабатының қалыңдығы; τ – өмір сүру уақыты; L – диффузиялық ұзындық

Қорытынды

- $p-n$ өткел p және n алаптарының жанасу шекарасында пайда болады;
- Зарядтар диффузиясы әсерінен $p-n$ өткелде электр өрісі – потенциалды тосқауыл пайда болады. Ол негізгі заряд тасымалдаушылар концентрациясының диффузия әсерінен теңгеріліп кетуіне жол бермейді;
- Сырттан кернеу түсірілмеген жағдайда $p-n$ өткелде динамикалық тепе-теңдік $\left(J_{\text{диф}} = J_{\text{др}}\right)$ орнайды;
- Тура ығысу кезінде $p-n$ өткелдің потенциалды тосқауылы азайып, енсізденіп, өткел арқылы салыстырмалы түрде үлкен диффузиялық ток жүреді;
- Кері ығысу кезінде $p-n$ өткелдің потенциалды тосқауылы жоғарылап, диффузиялық ток тиылып, өткел арқылы өте аз мөлшерде дрейфтік ток жүреді;
- $p-n$ өткел ені p және n аймақтардағы қоспа концентрациясынан және сыртқы кернеу шамасынан тәуелді болады.

Күштік диодтың вольтамперлік сипаттамасы



$$r_{\text{ст}} = \frac{u_F}{i_F}$$

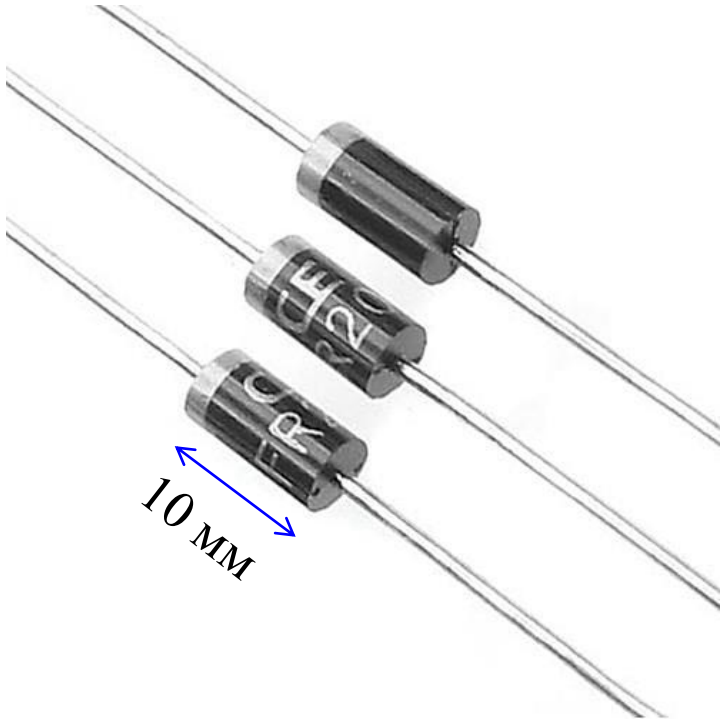
$$i_F = i_{\text{диф}} = i_S \cdot \exp\left(\frac{u_F}{\varphi_{\text{Т}}}\right)$$

$$i_R = -i_S$$

U_{FM} – импульсті тура кернеу;
U_{TO} – тоскауыл кернеуі;
U_{RWM} – рұқсат етілген жұмыс кернеуі;
U_{RRM} – қайталанып тұратын импульсті кернеу (ішкі факторларға негізделген, мысалы диодтың ашық күйден жабық күйге өтуі кезінде пайда болады);
U_{RSM} – қайталанбайтын импульсті кернеу (сыртқы факторларға негізделген, мысалы атмосфералық әсерлер немесе қоректендіруші желіде асқын кернеудің пайда болуы);
U_{BR} – тесу (пробой) кернеуі.

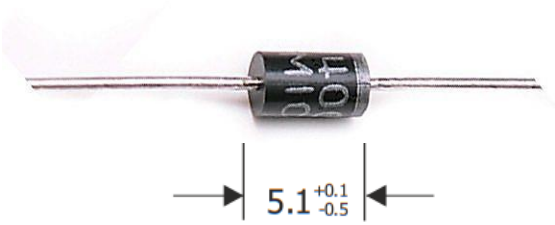
i_S – жылулық ток (p-n өткелдің қанығу тогы); $\varphi_{\text{Т}} = \frac{e}{k_{\text{Б}}T}$ – термиялық (жылулық) потенциал.

Жартылай өткізгішті диод



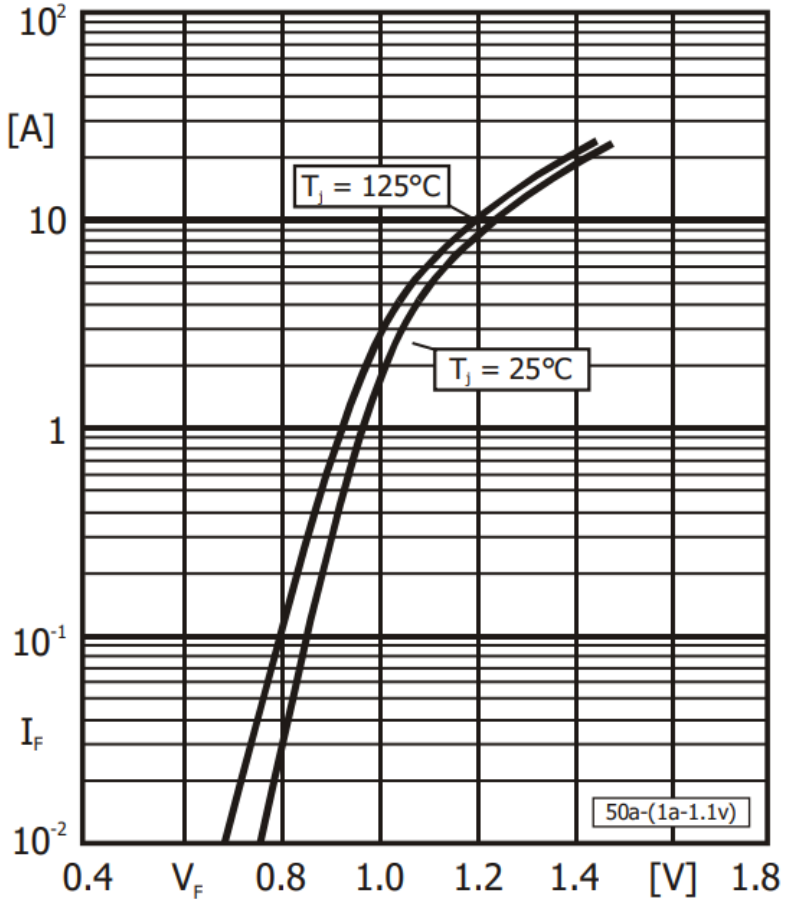


1N4007 диодының (Si) тура ығысу кезіндегі ВАС-ы

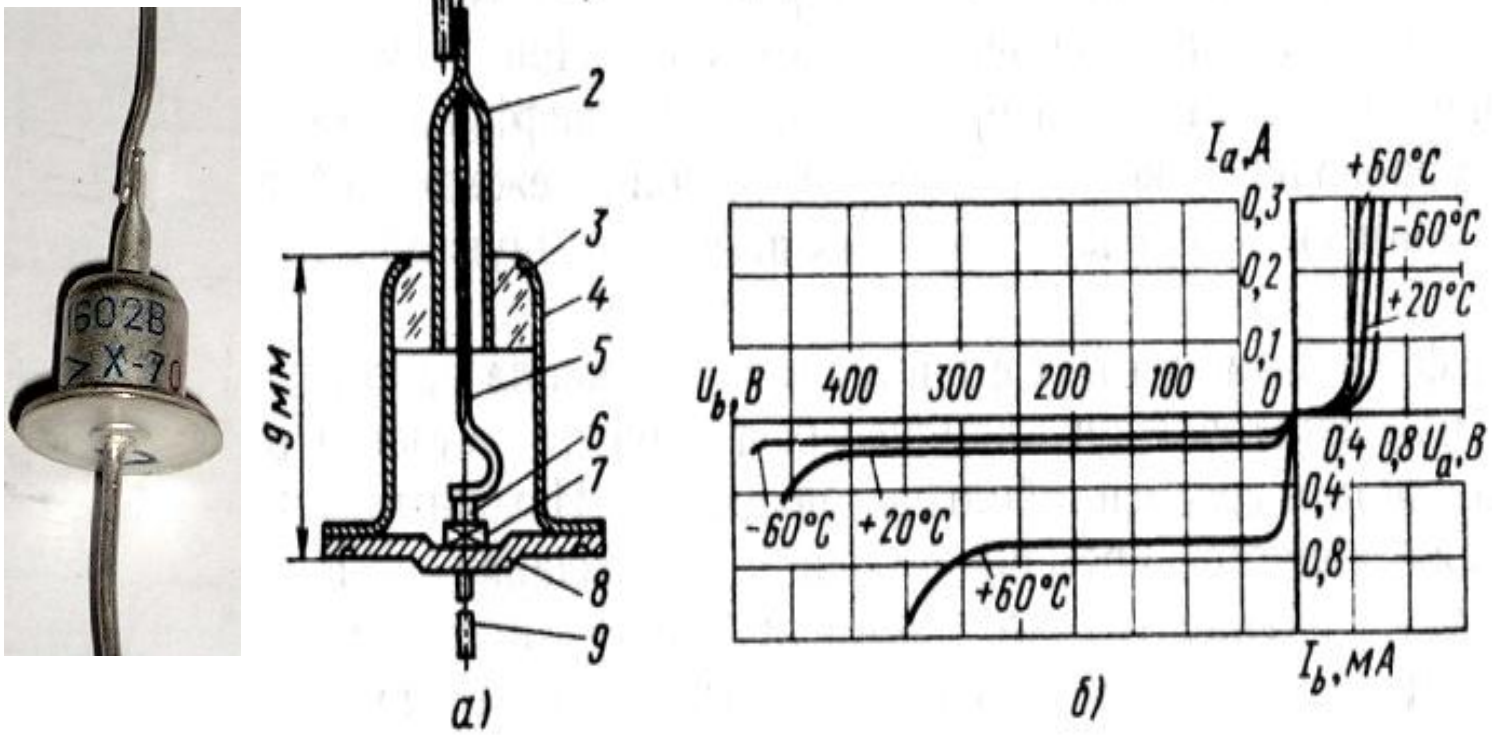


Рұқсат етілген
тура ток:
1 А

Рұқсат етілген
кері кернеу:
1000 В



Д7Ж, германиден жасалған аз қуатты диод және оның ВАС-ы.
1-анод, 6-индий (In) таблеткасы, 7-германий кристалы, 9-катод.



9 сурет

Диодтың негізгі сипаттамалары:

$U_{кері\ max}$ (максимал тұрақты кері кернеуі): 400 В; $I_{тура\ max}$ (максимал тура ток): 300 мА;
$f_д$ (жұмыс жиілігі): 2,4 кГц; $U_{тура}$ (тұрақты тура кернеуі): 0,5 В көп емес;
$I_{кері}$ (тұрақты кері ток): 100 мкА

$p - n$ өткелдің диффузиялық сыйымдылығы

Сыртқы кернеу өзгергенде көлемдік зарядтың мөлшері мен шамасының өзгеруі “сыйымдылықтың” өзгеруіне ұқсас, соның тәртібіне пара-пар. Электр тізбегі элементінің сыйымдылық реакциясы деп жалпы жағдайда элементке берілген кернеу өзгерген кезде ондағы зарядтың өзгерісін айтады ($q = CU$).

Диод тура ығысқан кездегі p және n аймақтардағы рекомбинацияланып үлгермеген зарядтардың жиналуы

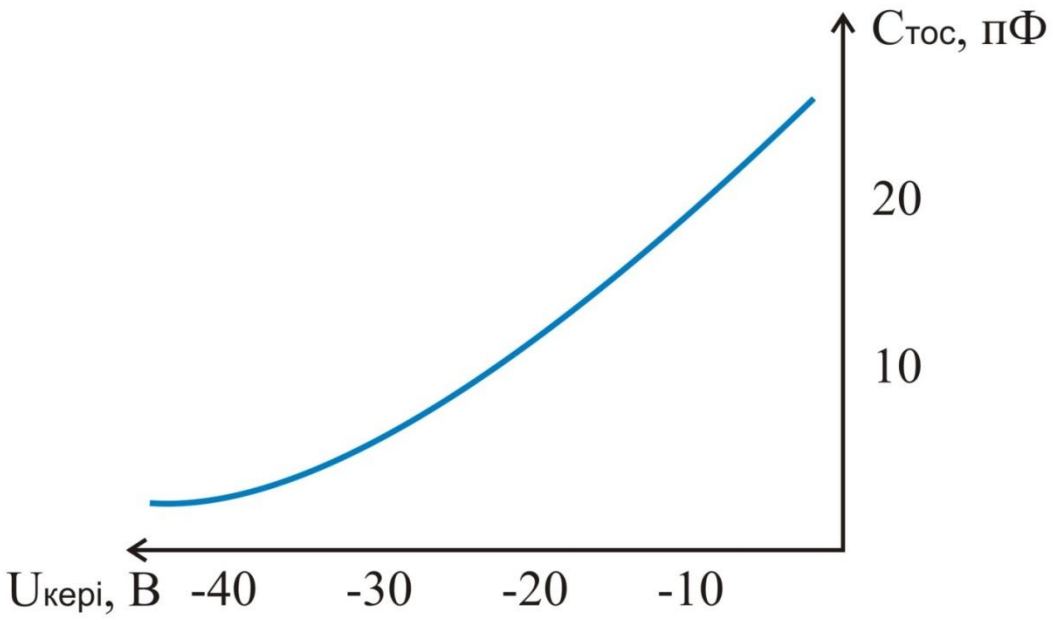
$$C_{\text{диф}} = \frac{dq}{dU} \qquad C_{\text{диф}} = \frac{di_F}{dU}\tau$$

Диод тура ығысқан кезде диффузиялық ток кернеу шамасына қарағанда тез өседі, сәйкесінше диффузиялық сыйымдылықта. Бірнеше микрофарадқа дейін

τ – зарядтардың өмір сүру уақыты

$p-n$ өткелдің тосқауылды сыйымдылығы

$$C_{\text{тос}} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d_{p-n}}$$



10 сурет. Вольт-фарадтық сипаттама (ВФС) . Бұл p-n өткелдің көлемдік заряд қабатының өткелге түсірілген кернеуге байланысты өзгеру динамикасын көрсетеді. U кернеуді тура бағытқа қарай өсірген кезде тосқауыл сыйымдылығы артады, өйткені өткел ені d_{p-n} кемиді.

Диодтарды классификациялау (жіктеу)

Тура токтың орташа мәні бойынша диодтарды келесі түрлерге жіктейді:

- аз қуатты: 300 мА дейін.
- орташа қуатты: 300 мА-10 А.
- қуатты (күштік): 10 А-1000 А.

Жиілік бойынша:

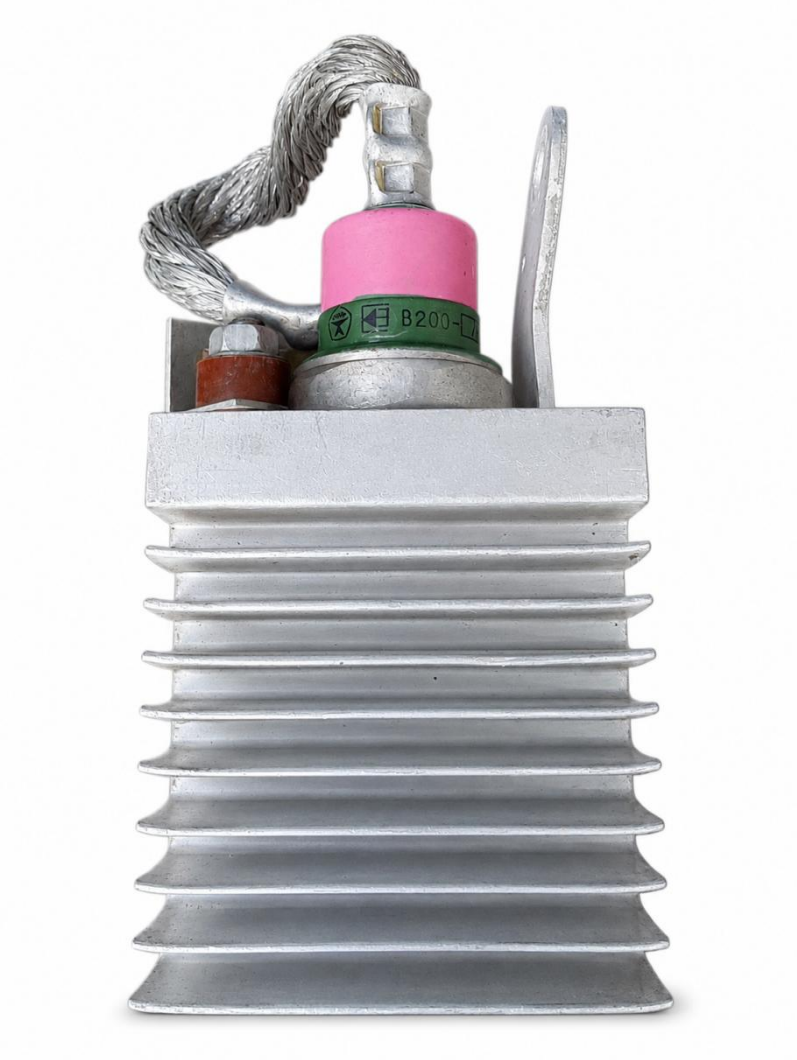
Төмен жиілікті, 400 Гц және жоғары жиілікті, 10-20 кГц

Жұмыс температурасы Ge: (-55°С) - 85°С

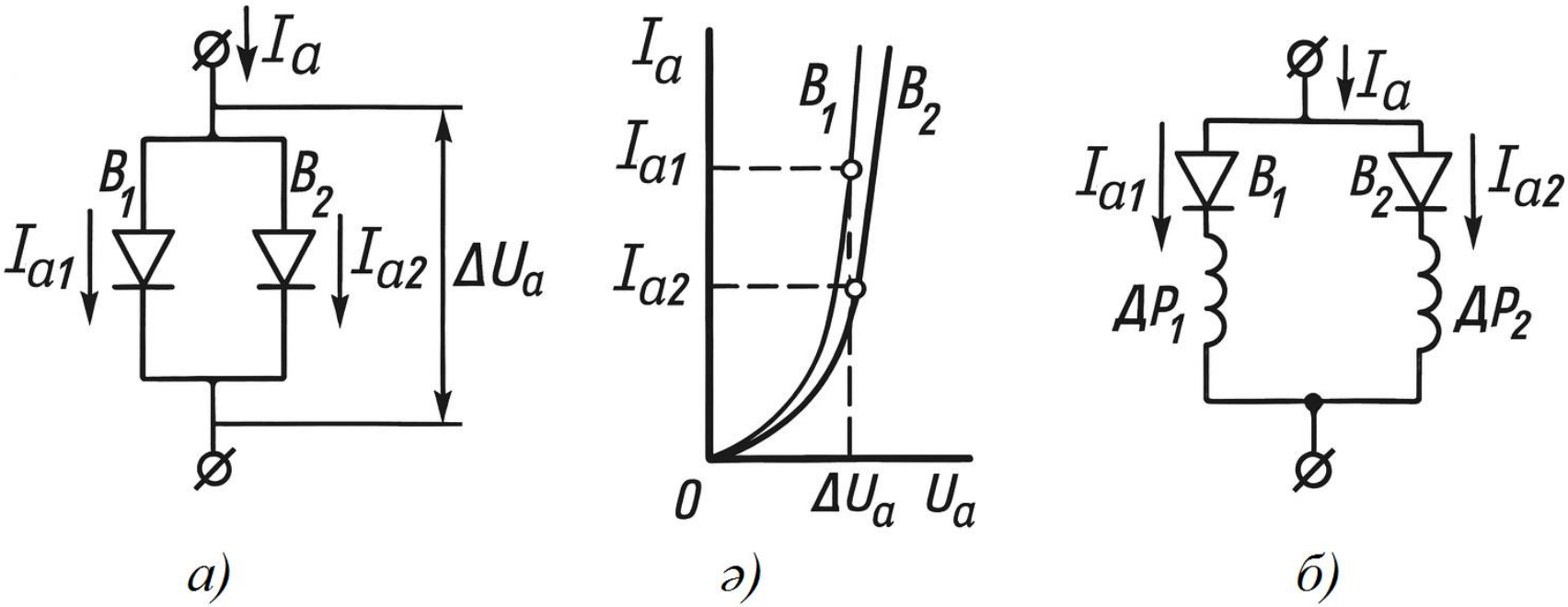
Si: (-55°С) - 170°С

Диодтарды суыту жүйелері



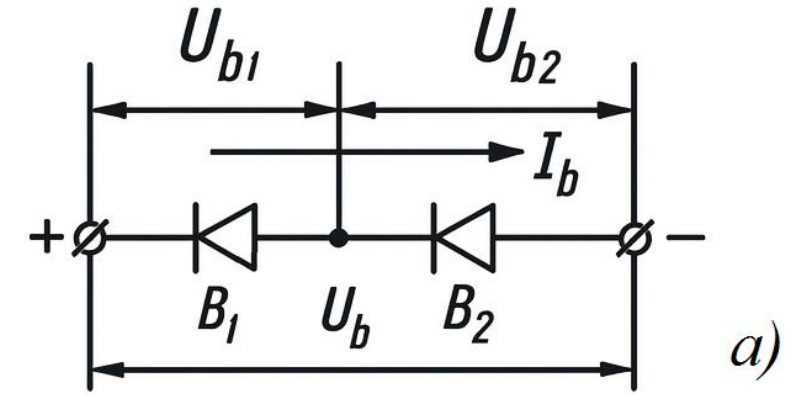


Диод бойынан өтетін суммалық тура ток күшін арттыру үшін диодтарды параллель жалғайды

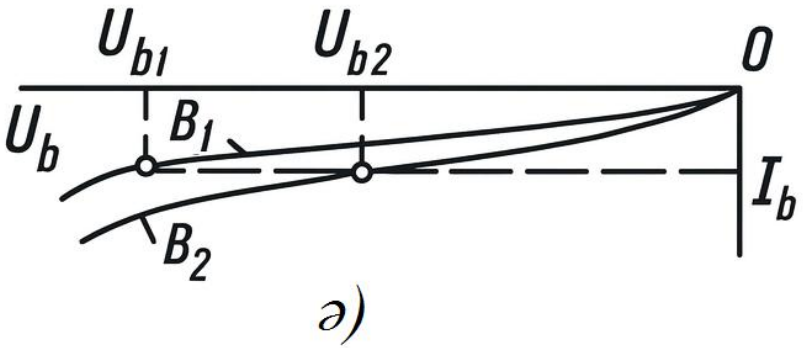


11 сурет

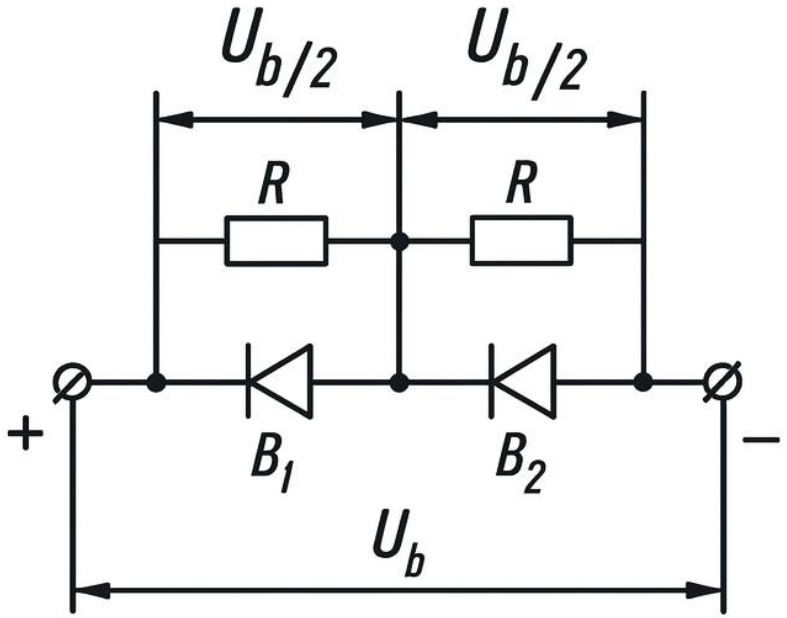
Суммалық рұқсат етілген кері кернеу шамасын үлкейту үшін диодтарды тізбектей жалғайды



а)



ә)



б)

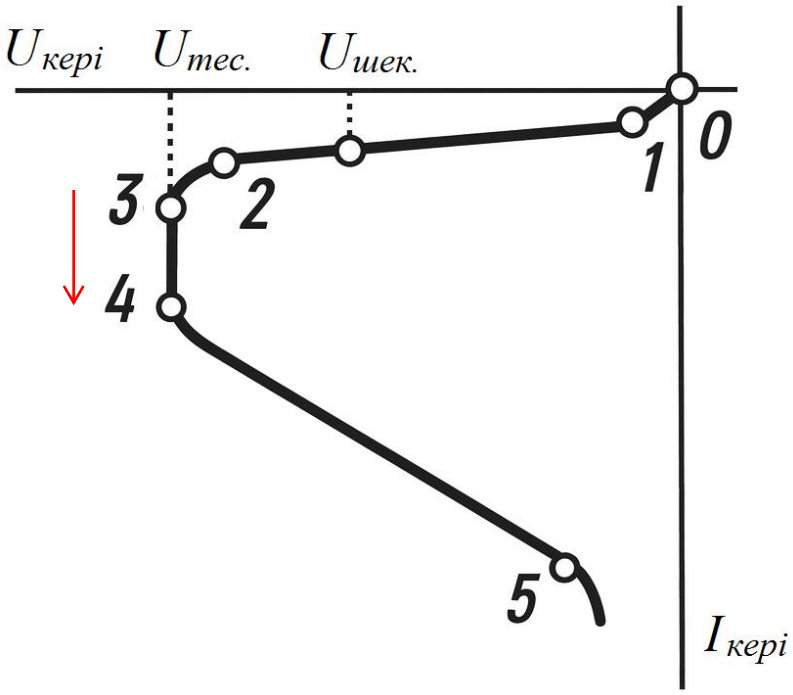
12 сурет

Резистор кедергісі, оның бойымен өтетін ток диодтан кері бағытта өтетін токтан бір деңгейге жоғары етіп таңдалады $\left(R < R_{\text{д кері}}\right)$.

Диодты электр тогының тесіп өтуі (пробой)

ВАС-ның кері тармағына *тоқтың тыс ағуы* және *зарядтардың генерациясы* әсер етеді, ол *p-n өткелдің тесілуіне* себепші болуы мүмкін.

Тыс ағатын ток кері кернеуден сызықты тәуелді. Ол *p-n* өткелдің бетінің ластануынан болады, демек беттік электр өткізгіштіктің жоғарылағанынан, 13 суреттегі қисықтың 1-2 бөлігіне сәйкес келеді. *p-n* өткелдегі зарядтардың генерациясы кері кернеу шамасы үлкейгенде байқалады. Бұл кезде кері кернеуден сызықты тәуелділік бұзылады (2-3 бөлік), демек кері ток шамасы дереу өседі (3-5 бөлік).



13 сурет

$p-n$ өткелдегі қосымша зарядтардың пайда болуы электрлік (1. Көшкіндік және 2. Туннельді) және жылулық әсерден болады

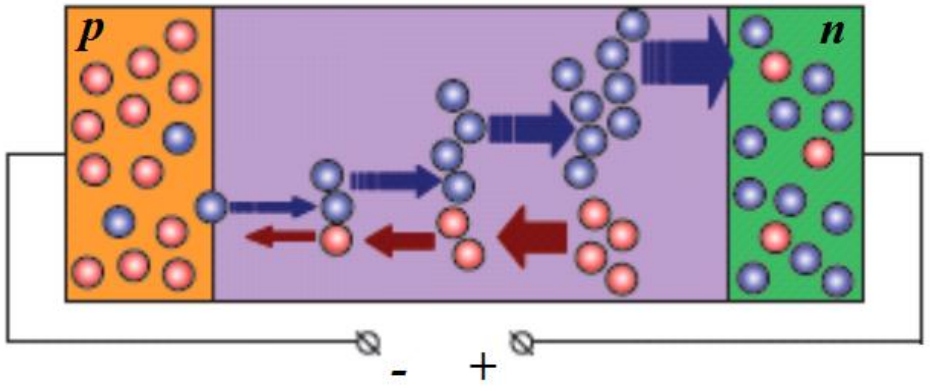
$$I_{кері} = M \cdot I_0$$

Көшкіндік көбею коэффициенті

$$M = \frac{I_{кері}}{I_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{U_{кері}}{U_{к.т.}}\right)^n}$$

Ge=3; Si=5

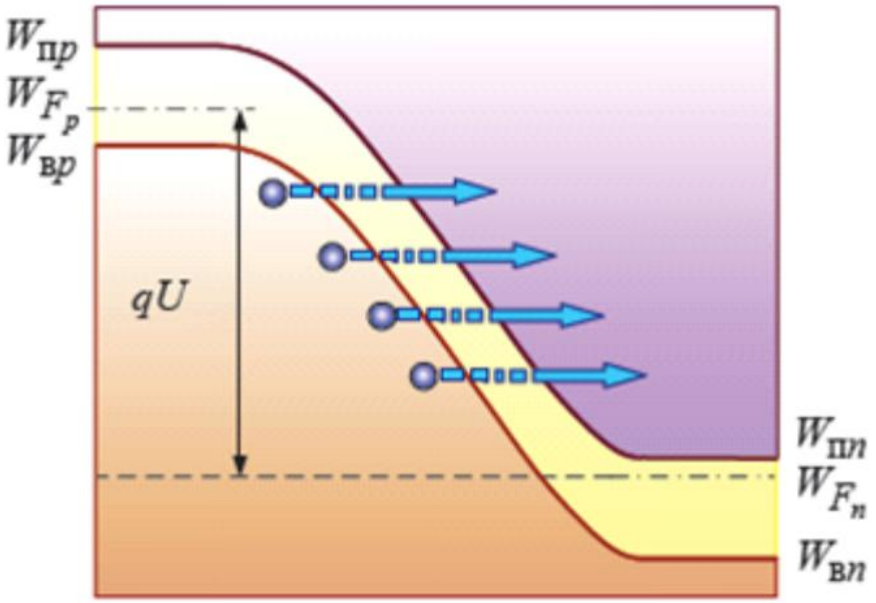
Көшкіндік тесілу кернеуі



14 сурет

Негізгі емес заряд тасымалдаушы бөлшектер $p-n$ өткел өрісінде ($8 \div 10 \cdot 10^4$ В/см) үдеп кристалдық тордың түйіндерінде орналасқан атомдармен қарқынды соқтығысады, нәтижесінде валенттік электрондарды жұлып шығып қосымша электрон-кемтік жұптарын тудырады. Осылайша босап шыққан зарядтар өз кезегінде көшкіндік дамуды жалғастарады. Бұл қалың $p-n$ өткелді (ені диффузиялық ұзындықтан әлдеқайда үлкен) жартылай өткізгіштерге тән.

Тунельдік тесілу

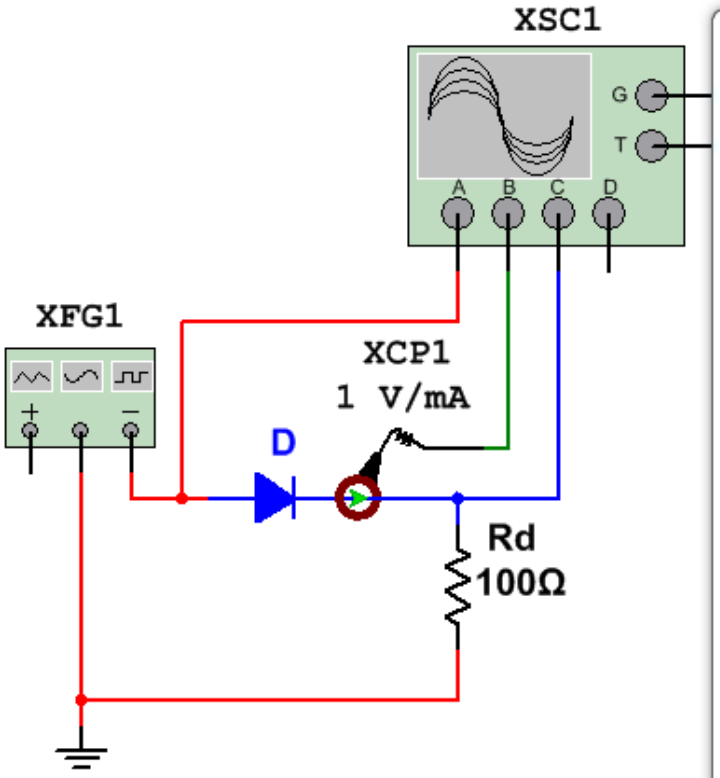


15 сурет

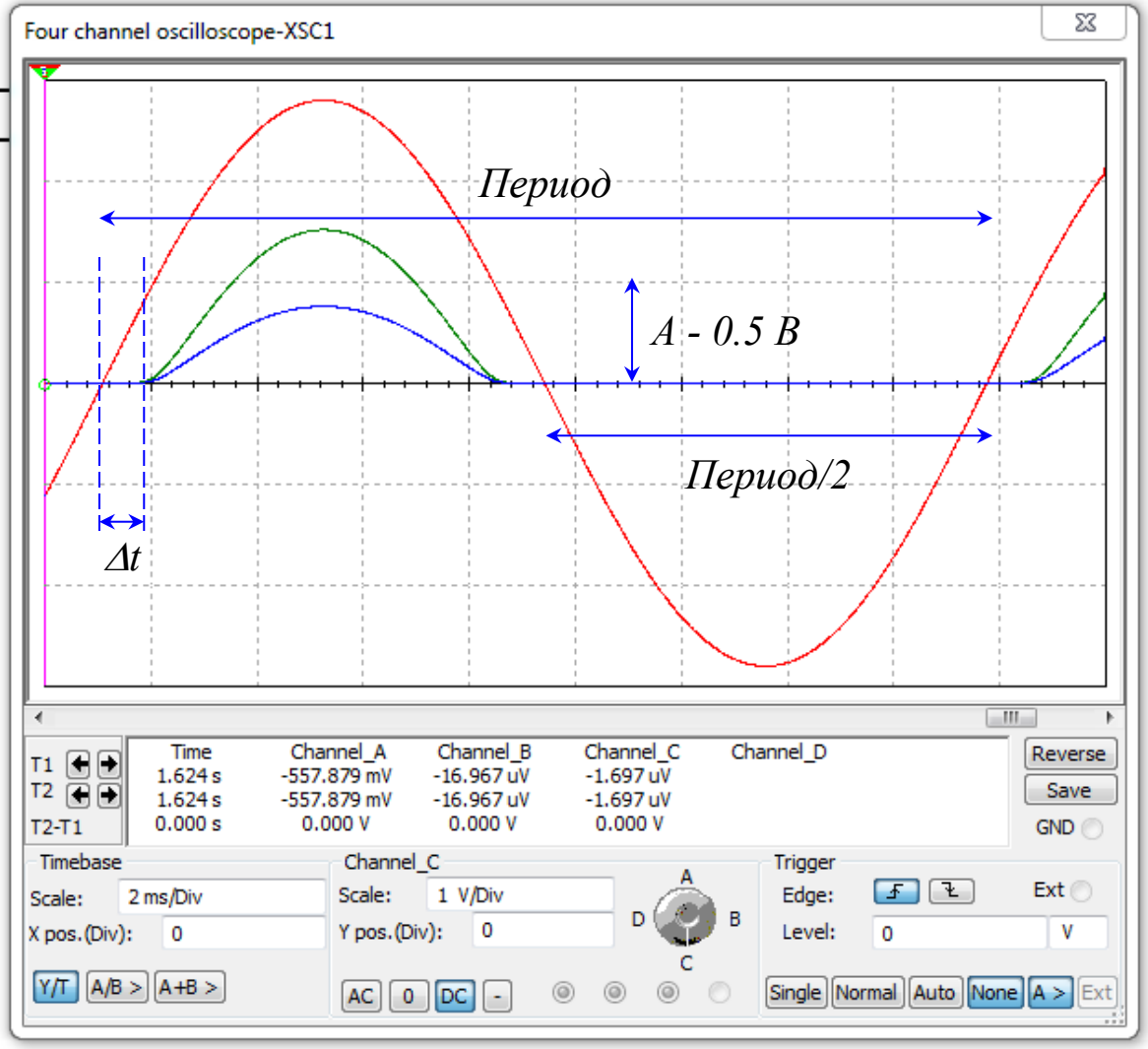
$p-n$ өткелі өте жұқа (0,01 мкм) жартылай өткізгіште жеткілікті кері кернеу шамасындағы күшті электр өрісі (10^6 В/см) әсерінен атомнан валенттік электронды жұлып алу нәтижесінде болатын кванттық құбылыс тунельдік тесілу деп аталады. Осы кезде пайда болған негізгі емес заряд тасымалдаушылар $p-n$ өткел арқылы «секіріп» өтетін кері токты көбейтеді.

$W_{вр}$ – p типті өткізгіштіктің валенттік аймақ энергиясы; $W_{пр}$ – p типті өткізгіштіктің өткізгіштік аймақ энергиясы

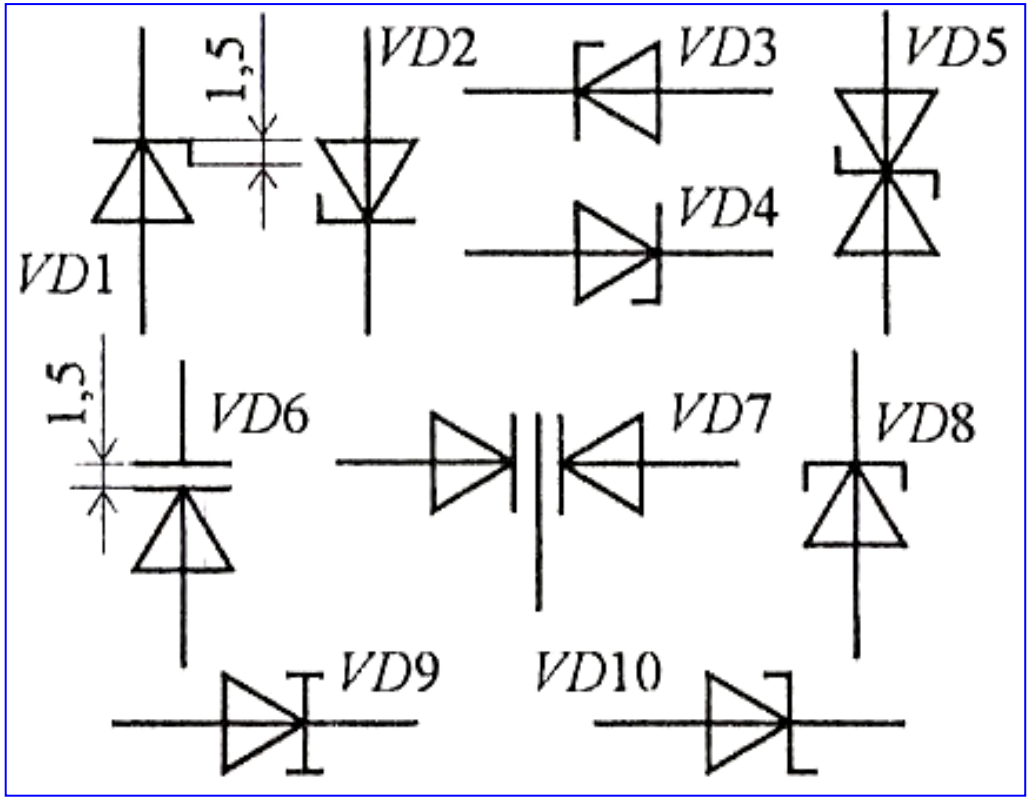
Бір жарты периодты кернеу түзеткіш

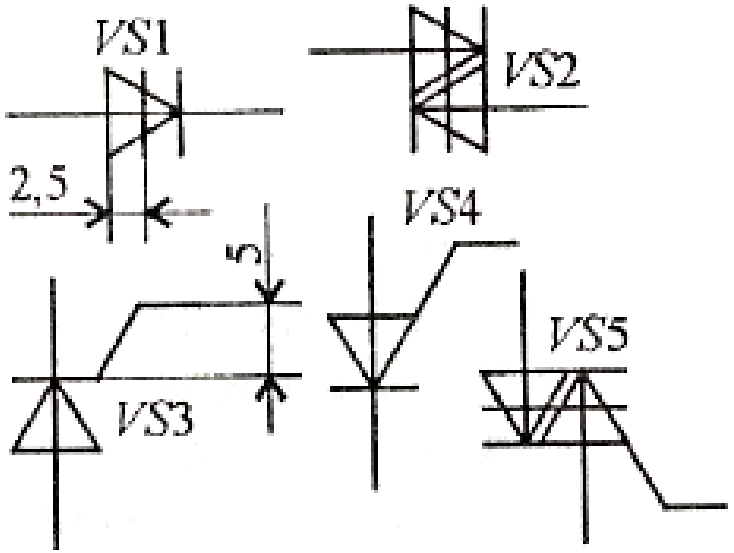


16 сурет



17 сурет





VD1-VD4 – стабилитрон, VD5 – екі анодты стабилитрон,
VD6 – варикап, VD7 – ортақ катоды бар варикап, VD8 – туннельді диод,
VD9 – кері диод, VD10 – Шоттки диоды.
VS1 – динистор, VS2 – симметриялы динистор,
VS3-VS4 – тринистор, VS5 – симметриялы тринистор.