

Lecture №4.

ELECTRONICALLY SWITCHING.

4-MA'RUZA:

ELEKTRON-ROVAK O'TISH.

REJA:

4.1. Elektron-kovak o'tish.

4.2. p-n o'tish toklari.

4.3. p-n o'tishning volt – amper xarakteristikasi (VAX).

Tayanch iboralar: elektron; kovak; p-n o'tish; elektr toki; xarakteristika, diffuziya; soha; patensiallar; chegara; zona; ionlar; konsentratsiya.

4.1. Elektron-kovak o'tish

Yarim o'tkazgichli asboblarning ko'pchiligi bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgichlardan tayyorlanadi. Xususiy xolatda bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgich bir sohasi p-turdagi, ikkinchisi esa n -turdagi monokristaldan tashkil topadi.

Bunday bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgichning p va n – sohalarining ajralish chegarasida hajmiy zaryad qatlami hosil bo'ladi, bu sohalar chegarasida ichki elektr maydoni yuzaga keladi va bu qatlam **elektron – kovak o'tish** yoki **p-n o'tish** deb ataladi. Ko'p sonli yarim o'tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalarning ishlash prinsipi p-n o'tish xossalari asoslangan.

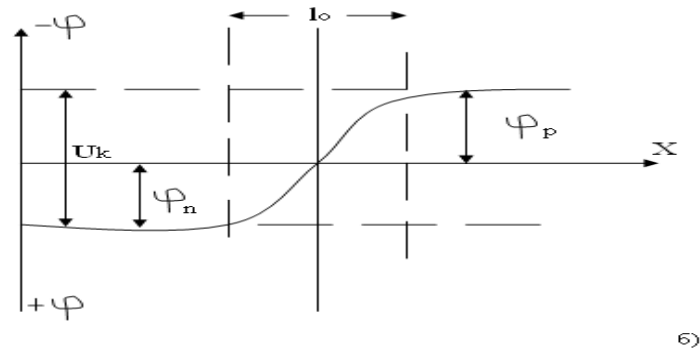
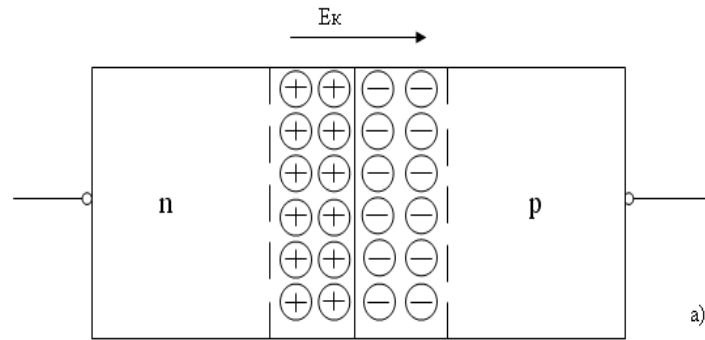
P-n o'tish hosil bo'lish mexanizmini ko'rib chiqamiz. Soddalik uchun, n -sohadagi elektronlar va p-sohadagi kovaklar sonini teng olamiz. Bundan tashqari, har bir sohada uncha katta bo'lmagan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar miqdori mavjud. Xona temperaturasida p-turdagi yarim o'tkazgichda akseptor manfiy ionlarining konsentratsiyasi N_a kovaklar

konsentratsiyasi p_p ga, n -turdagi yarim o'tkazgichda donor musbat ionlarining konsentratsiyasi N_d elektronlar konsentratsiyasi n_n ga teng bo'ladi. Demak, p - va n -sohalar o'rtasida elektronlar va kovaklar konsentratsiyasida sezilarli farq mavjudligi tufayli, bu sohalar birlashtirilganda elektronlarning p -sohaga, kovaklarning esa n -sohaga diffuziyasi boshlanadi.

Diffuziya natijasida n -soha chegarasida elektronlar konsentratsiyasi musbat donor ionlari konsentratsiyasidan kam bo'ladi va bu soha musbat zaryadlana boshlaydi. Bir vaqtning o'zida r -soha chegarasidagi kovaklar konsentratsiyasi kamayib boradi va u akseptor kiritmasi bilan kompensatsiyalangan ion zaryadlari hisobiga manfiy zaryadlana boshlaydi (10 – rasm). Musbat va manfiy ishorali aylanalar mos ravishda donor va akseptor ionlarini tasvirlaydi.

Hosil bo'lgan ikki hajmiy zaryad qatlami p - n o'tish deb ataladi. Bu qatlam harakatchan zaryad tashuvchilar bilan kambag'allashtirilgan. Shuning uchun uning solishtirma qarshiligi p - va n -soha qarshiliklariga nisbatan juda katta. Ba'zi adabiyotlarda bu qatlam **kambag'allashgan** yoki **i -soha** deb ataladi.

Hajmiy zaryadlar turli ishoralarga ega bo'ladilar va p - n o'tishda kuchlanganligi \vec{E} ga teng bo'lgan elektr maydon hosil qiladilar. Asosiy zaryad tashuvchilar uchun bu maydon tormozlovchi bo'lib ta'sir ko'rsatadi va ularni p - n o'tish bo'ylab erkin harakat qilishlariga qarshilik ko'rsatadi. 1 *b*-rasmda o'tish yuzasiga perpendikulyar bo'lgan, X o'qi bo'ylab potensial o'zgarishi ko'rsatilgan. Bu vaqtda nol potensial sifatida chegaraviy soha potentsiali qabul qilingan.



1 – rasm. p-n o‘tish.

Rasmdan ko‘rinib turibdiki, *p-n* o‘tishda voltlarda ifodalanadigan **kontakt potentsiallar farqiga** $U_K = \varphi_n - \varphi_p$ teng bo‘lgan potensial to‘siq yuzaga keladi. U_K kattaligi dastlabki yarim o‘tkazgich material ta‘qiqlangan zona kengligi va kiritma konsentratsiyasiga bog‘liq bo‘ladi. *p-n* o‘tish kontakt potentsiallar farqi: germaniy uchun $U_K \approx 0,35$ V, kremniy uchun esa $= 0,7$ V.

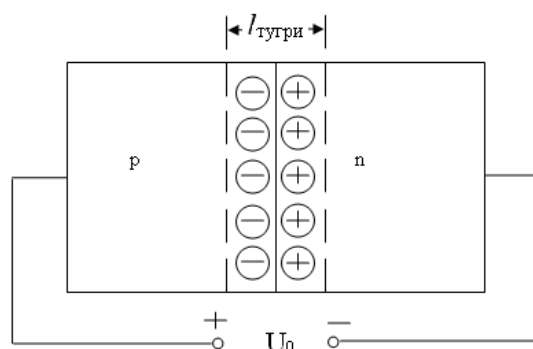
P-n o‘tish kengligi $l_0 \sqrt{U_K}$ ga proporsional bo‘ladi va mkmning o‘nlik yoki birlik qismlarini tashkil etadi. Tor *p-n* o‘tish hosil qilish uchun katta kiritma konsentarsiyasi kiritiladi, l_0 ni kattalashtirish uchun esa kichik kiritmalar konsentratsiyasi qo‘llaniladi.

4.2. p-n o‘tish toklari.

$U_i = \frac{U_R}{q}$ energiyaga ega bo'lgan ko'pgina zaryad tashuvchilar (11- rasmga

qarang) p-n o'tish orqali qo'shni sohalarga diffuziya hisobiga p-n o'tish maydoniga qarama-qarshi ravishda siljiydilar. Ular *diffuziya tokini* yuzaga keltiradilar. Asosiy zaryad tashuvchilarning p-n o'tish orqali harakati bilan bir vaqtda, p-n o'tish ular uchun tezlatuvchi bo'lib ta'sir ko'rsatayotgan maydon ta'sirida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar ham harakatlanadilar. Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar oqimi *dreyf tokini* yuzaga keltiradi. Tashqi maydon ta'sir ettirilmaganda dinamik muvozanat o'rnatiladi, ya'ni diffuziya va dreyf toklarining absolyut qiymatlari teng bo'ladi. Lekin diffuziya va dreyf toklari o'zaro qarama-qarshi yo'nalishda yo'nalganligi uchun, p-n o'tishdagi natijaviy tok nolga teng bo'ladi.

P-n o'tishning to'g'ri ulanishi. Agar p-n o'tishga tashqi kuchlanish manbai U ulansa, u holda muvozanat sharti buziladi va tok oqib o'ta boshlaydi. Agar kuchlanish manbaining musbat qutbi p-turdagi sohaga, manfiy qutbi esa n-turdagi sohaga ulansa, bunday ulanish *to'g'ri ulanish* deb ataladi (2 - rasm).



2 – rasm. p-n o'tishning to'g'ri ulanishi.

Kuchlanish manbaining elektr maydoni kontakt maydon tomonga yo'nalgan bo'ladi, shu sababli p-n o'tishdagi natijaviy maydon kuchlanganligi kamayadi. Maydon kuchlanganligining kamayishi potensial to'siq balandligini

kuchlanish manbai qiymatiga kamayishiga olib keladi: $U_K = U_0$. Bu vaqtda $p-n$ o'tish kengligini ham kamayishini ko'rish mushkul emas.

Potensial to'siq balandligining kamayishi shunga olib keladiki, $p-n$ o'tish orqali harakatlanayotgan asosiy zaryad tashuvchilarni soni ham ortadi, ya'ni diffuziya toki ortadi. Har bir sohada ortiqcha asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi yuzaga keladi – n -sohada kovaklar, p -sohada elektronlar. Biror yarim o'tkazgich sohasiga asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarni siqib kiritish jarayoni *injeksiya* deb ataladi.

Kuchlanish o'zgarishi bilan diffuziya tokining o'zgarishi eksponensial qonun asosida ro'y beradi:

$$I_{\text{diff}} = I_0 e^{qU_0/kT} \quad (4.1)$$

bu yerda I_0 – dreyf toki bo'lib, uni *$p-n$ o'tishning teskari toki* deb ham atashadi.

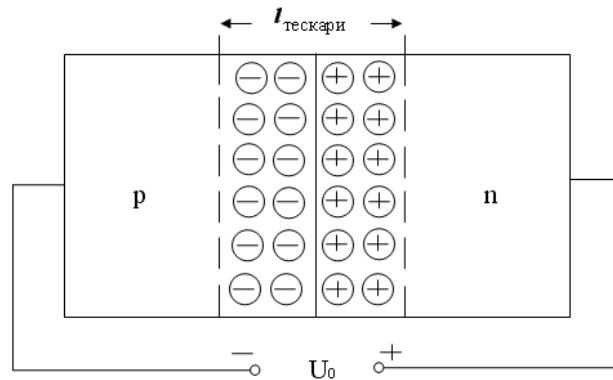
To'g'ri kuchlanish berilganda potensial to'siq balandligiga teskari tok ta'sir ko'rsatmaydi, chunki bu tok faqat $p-n$ o'tish orqali birlik vaqt ichida tartibsiz issiqlik harakati tufayli olib o'tilayotgan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning soni bilan belgilanadi. Diffuziya va dreyf toklari bir-biriga nisbatan qarama-qarshi yo'nalgan bo'ladi, shu sababli $p-n$ o'tish orqali oqib o'tayotgan natijaviy (to'g'ri) tok (2.1) dan kelib chiqqan holda

$$I_{\text{T\ddot{y}G}} = I_{\text{diff}} - I_0 = I_0 (e^{qU_0/kT} - 1) . \quad (4.2)$$

I_0 toki germaniyli $p-n$ o'tishlarda o'nlab mA yoki kremniyli $p-n$ o'tishlarda nanoamperlarni tashkil etadi va temperatura ortishi bilan kuchli

ravishda tok ham ortadi. Lekin I_0 qiymatidagi katta farq ta'qiqlangan zona kengligi bilan aniqlanadi.

P–n o'tishning teskari ulanishi. Bu holatda tashqi kuchlanish manbaining musbat qutbi *n*-sohaga ulanadi (3 - rasm).



3 – rasm. p-n o'tishning teskari ulanishi.

Kuchlanish manbaining elektr maydoni o'tishning kontakt maydoni yo'nalgan tomonga yo'nalgan. Shu sababli potensial to'siq balandligi ortadi va $U_K = U_0$ ga teng bo'ladi. Teskari kuchlanish qiymatining ortishi p-n o'tish kengligining kengayishiga olib keladi ($l_{T\ddot{Y}T} \sim l_{TECK}$). Amaliy hisoblarda quyidagi ifodadan foydalanish qulay:

$$l = l_0 \sqrt{\frac{U_0}{U_K}} \quad , \quad (4.3)$$

bu yerda $l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} U_K \left(\frac{1}{Na} + \frac{1}{Nd} \right)}$ - tashqi maydon ta'sir etmagandagi p–n kengligi, ε - yarim o'tkazgich nisbiy dielektrik doimiysi, ε_0 - elektr doimiy.

Potensial to'siqning ortishi diffuziya tokining kamayishiga olib keladi. Diffuziya tokining o'zgarishi eksponensial qonun asosida ro'y beradi

$$I_{\text{ДИФ}} = I_0 e^{-qU_0/kT} . \quad (4.4)$$

Dreyf toki potensial to‘siq balandligiga bog‘liq emasligi va I_0 ga teng bo‘lganligi sababli, p - n o‘tishdan o‘tayotgan natijaviy tok

$$I_{\text{ТЕСК}} = I_0 e^{-qU_0/kT} - I_0 = I_0 (e^{-qU_0/kT} - 1). \quad (4.5)$$

Teskari ulanishda kontaktlashuvchi yarim o‘tkazgichlardan asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar chiqarib olinadi (ekstraksiya). Shu sababli teskari tok *ekstraksiya toki* deb ataladi.

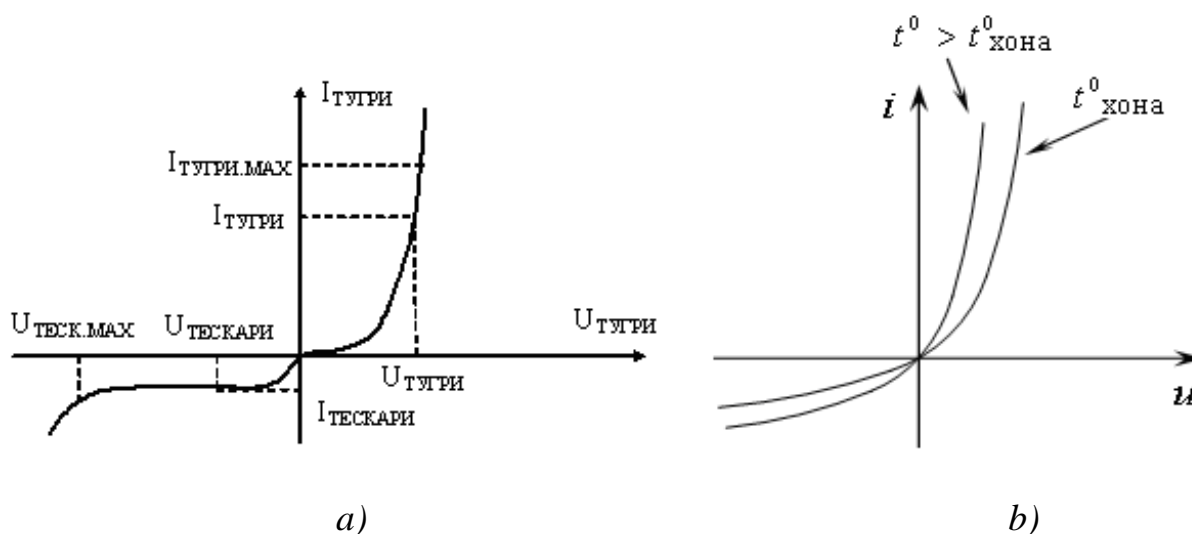
4.3. p - n o‘tishning volt – amper xarakteristikasi (VAX).

p - n o‘tish tokining unga berilayotgan kuchlanishga bog‘liqligi $I=f(U)$ volt–amper xarakteristika (VAX) deyiladi. (4.2) va (4.5) lar asosida umumiy holda eksponensial bog‘liqlik yordamida ifodalanadi (4 a - rasm).

$$I = I_0 (e^{\pm qU_0/kT} - 1). \quad (4.6)$$

Agar p - n o‘tishga to‘g‘ri kuchlanish berilgan bo‘lsa, U_0 kuchlanish ishorasi – musbat, teskari kuchlanish berilgan bo‘lsa esa - manfiy bo‘ladi. $U_{TUG} \geq 0,1$ V bo‘lsa eksponensial songa nisbatan birni hisobga olmasa ham bo‘ladi va kuchlanish ortishi bilan tok ham eksponensial ortib boradi. Teskari kuchlanish berilganda esa $-0,2$ V kuchlanish qiymatida tok I_0 qiymatiga yetib keladi va

keyinchalik kuchlanish qiymati o'zgar olmaydi. I_0 kattaligi shu sababli teskari ulangan *p-n o'tishning to'yinish toki* deb ham ataladi.



4 – rasm. Diodning VAX

Teskari tok to'g'ri tokka nisbatan bir necha darajaga kichik, ya'ni *p-n o'tish to'g'ri yo'nalishda* tokni yaxshi o'tkazadi, teskari yo'nalishda esa yomon. Demak, *p-n o'tish to'g'rilovchi* harakat bilan xarakterlanadi va uni o'zgaruvchi tokni to'g'rilashda qo'llashga imkon beradi.

Ekspontensial tashkil etuvchi $e^{qU_0/KT}$ temperatura ortishi bilan kamayishiga qaramay VAX to'g'ri shaxobchasidagi qiyalik ortadi (4 b-rasm). Bu hodisa I_0 ni temperaturaga kuchli to'g'ri bog'liqligi bilan tushuntiriladi. To'g'ri kuchlanish berilganda temperatura ortishi bilan tok ortishiga olib keladi. Amaliyotda *p-n o'tish VAXga* temperaturaning bog'liqligi ***kuchlanishning temperatura koeffisienti (KTK)*** deb ataladigan kattalik bilan baholanadi. KTKni aniqlash uchun temperaturani o'zgartirib borib, o'zgarmas tokdagi *p-n o'tish* kuchlanishini o'zgarishi o'lchab boriladi. Odatda KTK manfiy ishoraga ega, ya'ni temperatura ortishi bilan o'tishdagi kuchlanish kamayadi. Kremniydan yasalgan *p-n o'tish* uchun KTK 3 mV/grad darajani tashkil etadi.

(4.6) ifoda ideallashtirilgan p-n o'tish VAX sini ifodalaydi. Bunday o'tishda p va n-sohalarning hajmiy qarshiligi nolga teng va tok o'tish vaqtida p-n o'tishda rekombinatsiya jarayoni sodir bo'lmaydi deb hisoblanadi. Real o'tishda esa baza qarshiligi o'nlab Omga teng bo'ladi. Shu sababli (4.6) ifodaga p-n o'tishdagi va tashqi kuchlanish U_0 orasidagi farqni hisobga oluvchi o'zgartirish kiritiladi

$$I = I_0 \left(e^{q(U_0 - r_B I) / kT} \right) \quad (4.7)$$

p-n o'tish sig'imi. Past chastotalarda p-n o'tish toki faqat elektron – kovak o'tishning aktiv qarshiliklari hamda yarim o'tkazgichning p va n –sohalarining qarshiligi (r_B) bilan aniqlanadi. Yuqori chastotalarda p-n o'tishning inersiyasi uning sig'imi bilan aniqlanadi. Odatda p-n o'tishning ikkita asosiy sig'imi hisobga olinadi: diffuziya va to'siq (barer).

To'g'ri ulangan p-n o'tishda qo'shni sohalarga asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar injeksiyalanadi. Natijada p-n o'tishning yupqa chegaralarida qiymati jihatidan teng lekin qarama-qarshi ishoraga ega bo'lgan qo'shimcha asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar Q_{DIF} yuzaga keladilar. Kuchlanish o'zgarsa injeksiyalanayotgan zaryad tashuvchilar soni, demak zaryad ham o'zgaradi. Berilayotgan kuchlanish ta'siridagi bunday o'zgarish, kondensator qoplamalaridagi zaryad o'zgarishiga aynan o'xshaydi. Bazaga asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar diffuziya hisobiga tushganliklari sababli, bu sig'im **diffuziya sig'imi** deb ataladi va quyidagi ifodadan aniqlanadi

$$C_{DIF} = \frac{qI\tau}{kT}. \quad (4.8)$$

(2.8) ifodadan ko'rinib turibdiki, p-n o'tishdan oqib o'tayotgan tok va bazadagi zaryad tashuvchilarning yashash vaqti τ qancha katta bo'lsa, diffuziya sig'imi ham shuncha katta bo'ladi

Ikki elektr qatlamga ega bo'lgan elektron – kovak o'tish zaryadlangan kodensatorga o'xshaydi. O'tish sig'imi o'tish yuzasi S , uning kengligi va dielektrik doimiysi ϵ bilan aniqlanadi. O'tish sig'imi *to'siq sig'imi* deb ataladi va quyidagi ifodadan aniqlanadi

$$C_{T0} = S \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon q N d}{2U_K \left(1 + \frac{Nd}{Na}\right)}} . \quad (4.9)$$

O'tishga kuchlanish berilsa, bu vaqtda o'tish kengligi o'zgarganligi sababli, sig'im ham o'zgaradi. Sig'imning berilayotgan kuchlanish U qiymatiga bog'liqligi quyidagicha

$$C_B = C_{B0} \sqrt{\frac{U_K}{U_K \pm U}} . \quad (4.10)$$

To'g'ri ulangan o'tishda musbat ishorasi, teskari ulanganda esa manfiy ishora olinadi. S_B berilayotgan kuchlanishga bog'liqligi sababli p-n o'tishni o'zgaruvchan sig'imli kondensator sifatida qo'llash mumkin.

To'g'ri kuchlanish berilganda diffuziya sig'imi to'siq sig'imidan ancha katta bo'ladi, teskari kuchlanishda esa teskari. Shuning uchun to'g'ri kuchlanish berilganda p-n o'tish inersiyasi diffuziya sig'imi bilan, teskari ulanganda esa to'siq sig'imi bilan aniqlanadi.

P-n o'tishning teshilish turlari. Yuqorida aytib o'tilganidek, uncha katta bo'lmagan teskari kuchlanishlarda I_0 qiymati katta emas. Teskari kuchlanish

ma'lum chegaraviy qiymatga U_{ChEG} yetganda, teskari tok keskin ortib ketadi, o'tishning elektr teshilishi yuz beradi.

O'tishning teshilish turlari ikki guruhga bo'linadi: elektr va issiqlik. Elektr teshilishining ikki mexanizmi mavjud: ko'chkisimon va tunnel teshilish.

Ko'chkisimon teshilish nisbatan keng p-n o'tishlarda sodir bo'ladi. Bunday o'tishda teskari kuchlanishda elektron va kovaklar zarba ionizatsiyasi uchun yetarli bo'lgan energiya oladilar va natijada qo'shimcha elektron-kovak juftlar hosil bo'ladi. Bu juftliklarning har bir tashkil etuvchisi, o'z navbatida, elektr maydonida tezlashib, yana yangi juftlikni yuzaga keltiradi va x.z. Zaryad tashuvchilarning bunday ko'chkisimon ko'payishi natijasida o'tishdagi tok keskin ortadi.

Tor p-n o'tishga ega bo'lgan yarim o'tkazgichlarda tunnel effektiga asoslangan **tunnel teshilish** sodir bo'ladi. $U_{TES} \geq U_{ChEG}$ yetganda zaryad tashuvchilarning bir sohadan ikkinchisiga energiya sarf qilmasdan o'tishga imkon yaratiladi (tunnel effekti). U_{ChEG} ning yanada ortishi bilan shuncha ko'p zaryad tashuvchilar tunnel o'tishi sodir etadilar va teskari tok keskin ortib boradi.

p-n o'tishda **issiqlik teshilishi** teskari tok o'tish natijasida o'tishning qizishi hisobiga sodir bo'ladi. Teskari tok, issiqlik toki bo'lib, u ortgan sari qizish ham ortadi. Bu holat tokning ko'chkisimon ortishiga olib keladi, natijada p-n o'tishda issiqlik teshilishi yuz beradi va u ishdan chiqadi.

Nazorat savollari.

1. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi nima?
2. Elektron-kovak o'tish deb nimaga aytiladi?
3. p-n o'tish toklari nima?
4. p-n o'tishning volt – amper xarakteristikasi deb nimaga aytiladi?
5. kontakt potentsiallar farqi nima?
6. diffuziya tokini ayting?

7. kuchlanishning temperatura koeffisienti nima?
8. p-n o'tish sig'imi nima?