

**O`ZBEKISTON RESPUBLIKASI
XALQ TA'LIMI VAZIRLIGI**

JIZZAX DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI

**FIZIKA – MATEMATIKA FAKULTETI
UMUMIY FIZIKA KAFEDRASI**

KVANT FIZIKA
fanidan

O'ROLOV JAHONGIRning

REFERAT

Jizzax – 2014 yil

TUNEL samarasi. P – n – o'tish yoki metall - yarim o'tkazgichli tizimlarda kinetik energiyasi potentsial tushiq balandligidan kichik bo'lgan hollarda elektronlar yupka potentsial to'siqdan o'z energiyasini o'zgartirmasdan utib keta oladilar. Xuddi Shuningdek manfiy kitta kuchlanish ta'siridagi P – n – o'tishlarda ham xuddi Shunday hol valent zonasidagi elektronlar taqiqlangan zona orqali o'tkazuvchanlik zonasiga o'z energiyasini o'zgartirmasdan o'tishlari sodir bo'lishi mumkin. Bu hol *tunel o'tishi* deb aytiladi. Bunday tabiatli o'tishlar potentsial to'siqning *tiniqligi* kattaligi orqali ifodalandi¹. 1958 y. Ezaki bu hodisani kuzatish maqsadida tok taShuvchilar kontsentratsiyasi 10^{19} cm^{-3} dan ortiq bo'lgan germaniydan, qalinligi 10^{-6} cm li kam ligirlangan sohali diod tayyorladi. Bunday diodlarda teskari tokning qiymati diffuziyaviy tabiatli to'g'ri tokning qiymatining bir necha tartibda katta bo'ldi. Ezaki diodining volt- amper tavsifining ko'rinishi o'zgacha: to'g'ri tokning qiymati kuchlanishning ortishi bilan ortib, maksimumga erishib, so'ngra tezda kamaygan. Biroq kuchlanishning yana ortib borishida to'g'ri tok yana ortgan. Qizig'i shundaki, volt- amper tavsifining minimumdan keyingi tabiati r-n o'tishning odatdagi volt- amper tavsifiga o'xshashligicha qoladi.

Agar elektron gazi r-va n – sohalarida tuslanmaganligicha qolsa, ya'ni Fermi sathlari μ_p va μ_n taqiqlangan zona ichkarisida joylashgan bo'lsa, u holda *tunel samarasi*

$$-eU = |\mu_p| + |\mu_n| = |\mu_p + \mu_n|$$

shartni qanoatlantiruvchi tusuvchi kuchlanishlarda sodir bo'ladi. Bunda tabiiyki, valent zonasining shipi o'tkazuvchanlik zonasining pastki chegarasidan Yuqorida joylashgan bo'ladi. Kichik kuchlanishlarda va $U > 0$ hollarda valent zonasining n – sohasi ro'parasida taqiqlangan zona yotganligi sababidan elektronlarning tunel mexanizmi bilan zonalararo o'tishlari sodir bo'lmaydi.

Tushunarliki, tashqi kuchlanish bo'lmaganida elektronlarning bir zonadan ikkinchisiga o'tishlari biri ikkinchisini kompensatsiyalaydi va umumiy tok bo'lmaydi. Diodga manfiy kuchlanish qo'yilib, uning qiymati orta borgan sari n – sohada o'tkazuvchanlik zonasi pasayib (r - soha valent zonasi ko'tarilib), valent zonasidan, ya'ni r – sohadan n - sohaga elektronlarning oqimi boshlanib, kuchlanishning ortishi bilan orta boradi

Tunnel mexanizmi. Tunnel diodining odatdagi statistik volt- amper tavsifi 5a-rasmda keltirilgan. Teskari qutbiy kuchlanish qo'yilganda (manfiy qutb r – sohaga ulanganida) tok monoton ravishda ortib boradi. To'g'ri kuchlanish ulanganida esa dastlab tok ortib, maksimal (tokning grafik chuqqisiga mos keluvchi I_p) qiymatiga erishib² kuchlanish U_v qiymatga erishgungacha tok I_v qiymatga qadar kamayib borib, so'ngra yana ortib ketadi. Kuchlanishning qiymati U_v dan ortganidan boshlab tok va kuchlanish o'rtasidagi mutanosiblik eksponentsial ko'rinishda bo'ladi. Statistik volt- amper tavsif, bunday holda:, vohalardagi tok, diffuziyaviy tok va eksponetsial tok kabi tashkil etuvchilardan iborat. Biroq keyinchalik faqat *zonalararo tunnel o'tishga asoslangan tok*ning fizikaviy tabiatini izohlash uchun o'ta past haroratlar sohasidagi sodda zonali yarim o'tkazgichlarda kechadigan *tunneli hodisasini* tasvirlaymiz. Fermining energetiyaviy sathi ruxsat etilgan zonalar ichida joylashgan bo'lib, termodinamik muvozanatda hamma joyda doimiyligicha qoladi. R- n o'tikning u va bu tomonlarida Fermining energetiyaviy sathining Yuqoridagi holatlari bo'sh bo'lib, uning

Shunday qilib, nol haroratda va tashqi maydoni tajriba»siri bo'lmaganda *tunnel toki* oqmaydi. Tashqi kuchlanish ta'sir etganida elektronlarning valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga va teskari yo'nalishdagi *tunnel o'tishlari* sodir bo'ladi.

¹ Tunel samarasi bilan dielektrikning teshilishi Ziner tomoidan topilganligi bois bu xodisa *Ziner teshilishi* deb nomlanadi.

² Grafikning chuqqisiga mos keluvchi kuchlanishning qiymatini U_p kabi belgilaymiz.

6a –rasmda p-n o'tikdan elektronlarning valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga tunnel o'tishlari tasvirlangan. Bunga mos keluvchi tokning qiymati 6a-rasmda nuqta orqali ifodalangan. To'g'ri yo'nalishli kuchlanish (6v - rasm) qo'yilganda n – sohada to'lgan holatlar va p- sohada esa bo'sh holatlarni hosil qiluvchi energiyaviy hol sodir bo'ladi. To'g'ri yo'nalishli kuchlanishning qiymati orttirilgan sari (6g-rasm) p-sohadagi bo'sh holatlar kamayaveradi. Bu hol zonalar “energiyaviy» kesishgunga; qadar, ya»ni r- sohadagi valent zonasining shipi va n – sohadagi o'tkazuvchanlik zonasi bo'saxonasi bilan energiya jihatidan mos tushgunga qadar davom etaveradi. To'g'ri kuchlanishning keyingi orttirilishi jarayonida n-sohaning to'ldirilgan holatlari qarama-qarshisida p-sohaning ta'qiqlangan holatlari ro'baru bo'la boshlaydi. Bunda tunnel toki yuzaga kelmaydi. Bunday holdagi tok taShuvchilarning oqimi *diffuziyaviy tabiatli* bo'ladi. Shu sababdan kuchlanishning orttilishida volt- amper tavsif eksponentsial tabiatli bo'ladi (6d - rasm).

Tabiiyki, to'g'ri kuchlanishning noldan boshlab orta borishida tunnel toki, dastlab, noldan I_p ga qadar ortib borishi kerak va u kuchlanish $U = U_n + U_p$ munosabatni qanoatlantiruvchi qiymatga erishganda nolga aylanishi kerak. Bu erda U - qo'yilgan kuchlanish, U_n - n – sohaning, U_p - p- sohaning tuslanish darajasi [$U_n \equiv e(E_{F_n} - E_C)$, $U_p \equiv e(E_V - E_{F_p})$, E_{F_n} va E_{F_p} - mos holda n-va p-sohalaridagi Fermining energetiyaviy sathlari](7-rasm).

Tunnellanish samarasining fizikaviy tabiati. Tunnel toki. Agar yarim o'tkazgich etarli kuchli ($|\vec{E}| \approx 10^6 \text{ V/cm}$ kuchlanganlikli) elektr maydoniga kiritilsa, yarim o'tkazgichning valent zonasi va o'tkazuvchanlik zonasi o'rtasida kvant mexanikaviy tunnel samarasi sodir bo'lish ehtimolligi (E_{F_n}) chekli qiymatga ega bo'lib, elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasi energiyalarini o'zgartirmagan holda zonalararo o'tishi sodir bo'lishi mumkin. Ventsel – Kramers – Briluen yaqinlashishiga asoslanilsa 9-rasmda keltirilgan uchburchaksimon va parabolaksimon potentsial to'siqlar uchun elektronlarning to'lqin vektorlari mos holda

$$k(\vec{r}) = \left[\frac{2m^*}{\hbar^2} \times \left(\frac{E_g}{2} - e\vec{E} \times \vec{r} \right) \right]^{1/2}, \quad (13.35)$$

$$k(\vec{r}) = \left[\frac{2m^*}{\hbar^2 E_g} \times \left(\frac{E_g^2}{4} - e^2 (\vec{E} \times \vec{r})^2 \right) \right]^{1/2}$$

ifodalardan aniqlanib, mos holda tunnel samarasining sodir bo'lish ehtimolliklari esa

$$T_{tun} \psi_n(x) = \frac{e^{-\eta^2}}{\sqrt{z^n n!} \sqrt{\pi x_0}} H_n(\eta), \quad (13.36)$$

$$T_{tun} \approx \exp \left[-2 \int_{u_1}^{u_2} |k(\vec{r})| d\vec{r} \right] = \exp \left(-\frac{\pi \sqrt{m^*}}{2\sqrt{2}e\hbar |\vec{E}|} E_g^{3/2} \right)$$

ifodalardan aniqlaniadi. Bu ifodalarni hisoblashda $\frac{E_g}{2} - e\vec{E} \times \vec{r} = 0$ munosabatdan x_1 ,

$\frac{E_g}{2} - e\vec{E} \times \vec{r} = E_g$ munosabatdan esa x_2 chegaraviy qiymatlar aniqlangan. Bu erda E_g -yarim o'tkazgichning tajriba»qiqlangan zonasining kengligi, E - elektronlarning tunnelli kirib borish energiyasi.

Endi eng sodda yaqinlashishda tunnel tokini hisoblaymiz. Bunda valent va o'tkazuvchanlik zonalarining holatlar zichligini »tiborgna olamiz. So'ngra tunnellanishda tok taShuvchilar to'la – yig'indi momentlarining o'zgarasligini »tiborgna olamiz. Tabiiyki

termodinamik muvozanatda valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tayotgan $I_{V \rightarrow C}$ tunnel toki o'tkazuvchanlik zonasidan valent zonasiga o'tayotgan $I_{C \rightarrow V}$ tunnel toki bilan o'zaro kompensatsiyalanadi. Ular

$$I_{C \rightarrow V} = A \int_{E_c}^{E_v} f_C(E) n_C(E) T_{tun} \{1 - f_V(E)\} n_V(E) dE \quad (13.37)$$

$I_{V \rightarrow C}$ uchun ifoda (13.37)dagi pastki indekslarda $C \leftrightarrow V$ almashtirish bilan aniqlanadi; A doimiy kattalik, $f_C(E)$, $n_C(E)$ va $f_V(E)$, $n_V(E)$ mos holda o'tkazuvchanlik zonasi va valent zonasidagi elektronlarning taqsimot funksiyalari va holatlar zichliklari. Bu holda va keyinchalik $C \rightarrow V$, $V \rightarrow C$ o'tishlarga mos keluvchi tunnel o'tish ehtimolliklari bir xil deb hisoblaymiz. Shuningdek elektronlar va kavaklarning samaraviy massalarni bir xil deb hisoblasak *umumiy tunnel tokini*

$$I_{tun} = \frac{em^*}{2\pi^2 \hbar^2} \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m^*}}{2\sqrt{2}e\hbar |\bar{E}|} E_s^{3/2}\right) \left(\frac{\bar{E}}{2}\right) D \quad (13.38)$$

ifodadan aniqlash mumkin;

$$D \equiv \int [f_C(E) - f_V(E)] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{2E_s}{\bar{E}}\right)\right] dE$$

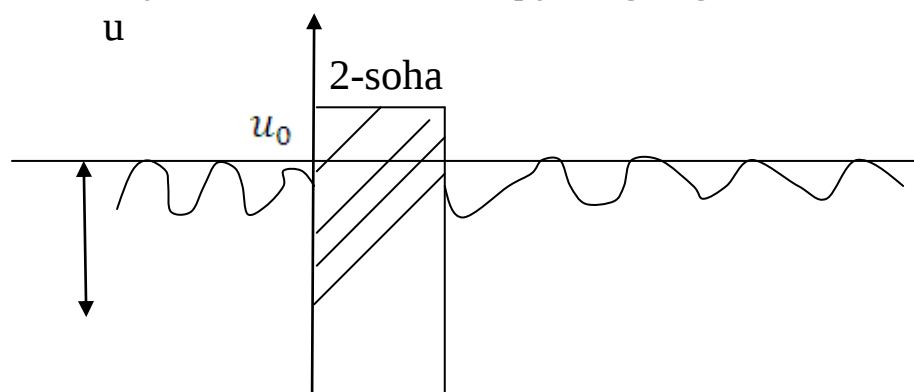
Bu erda $\bar{E} = \frac{\sqrt{2}e\hbar |\bar{E}|}{\pi \sqrt{m^* E_g}}$ energiyaviy birlikli kattalik bo'lib, uning qiymati elektron momenti

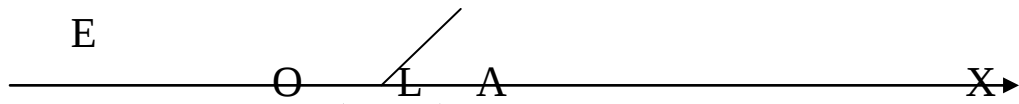
ko'ndalang tashkil etuvchisining qiymati bilan aniqlanadai. Xususan agar bu kattalik kichik qiymatli bo'lsa, kichik ko'ndalang tashkil etuvchili momentga ega bo'lgan elektronlarga tunnellanishi mumkin, chunki, tunneellanish ehtimolligi bu kattalikka eksponentsial ravishda kamayuvchi bo'lib bog'langan. E_s - $\bar{E}$ kattalikning eng kichik qiymatidir. Shunday qilib tunnel diodining volt- amper tavsifi energiyaviy birlikli kattalik D orqali ifodalanadi. Bu kattalik esa haroratga va o'tkazuvchanlik zonasi va valent zonalariga kirib borish energiyalari: eU_n va eU_p larga bog'liq holda o'zgaradi.

Tunnel tokining maksimal qiymati $U = U_n + U_p - (U_n^2 - U_p^2)^{1/2}$ kuchlanishga mos kelib, holatlar zichligining maksimal qiymati esa $D_{\max} = \frac{e^3}{3\bar{E}^2} \left[(U_n^2 + U_p^2)^{3/2} - (U_n^3 + U_p^3) \right]$ munosabat yordamida topiladi.

Potensial to'siq. Tunnel effekti

Zarraning bir o'lchovli harakatini muhim holidan yana biri uning potensial to'siqdan o'tishidir. Bu masala garmonik otsilyator masalasining echimidan bevosita kelib chiqadi. Malumki, garmonik otsilyator masalalari to'lqin funksiyasining qiymati potensial ura tashqarisida ham, yani potensial ura ortadi ham zarrani qayd qilish ehtimoli mavjud bo'lib, u chekli qiymatga ega.





Rasmda to'liqin funksiya potentsiali De-Broylning A va V nuqtalaridan ichkariga o'tib tezda nolga aylanishi tasvirlangan. A va V nuqtalarda to'liqin funksiya chekli qiymatga ega bo'lishi mumkin. Keyin nima bo'ladi degan savolga javob topish uchun yuqqa potensial devor- potensial to'siqni ko'ramiz. Rasmda $U > E$ uchun potensial to'siq tasvirlangan. Rasmdan ko'rinadiki, to'liqin funksiyaning birinchi sakrash $X=0$ nuqtada, ikkinchisi esa $X=a$ nuqtada ro'y beradi. Natijada, X - o'qi uchta sohaga bo'linadi:

$$U(X) = \begin{cases} 0, & \text{agar } x < 0 \text{ bo'lsa} \\ U_0, & \text{agar } 0 < x < 1 \text{ bo'lsa} \\ 0, & \text{agar } x > 1 \text{ bo'lsa} \end{cases} \quad (22)$$

I-soha $U_I = 0$, II-soha $U_{II} = U_0 \neq 0$ III-soha $U_{III} = 0$ (23)
yuoridagi rasmda garmonik otsilyatorning energetic sathlaridan biri tasvirlangan.

Satxning to'la energiyasi, masalan, E , to'siq balandligidan kichik bo'lsin. Bu sathda to'siqning maksimal potentsiyali energiyasi zarraning to'la energiyasidan katta bo'lgan holda ham to'liqin funksiya bu sathda chekli qiymatga ega bo'ladi. Boshqacha aytganda zarraning qayd qilishini mumkinligi rasmda III soxada tasvirlangan.

Bu masalani echish uchun I,II,III sohalardagi to'liqin funksiyalarini ψ_1, ψ_2, ψ_3 deb belgilaymiz va har bir soha uchun Shredinger statsiyanar tenglamasini quydagi ko'rinishda yozamiz.

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi_1}{dx^2} &= E \psi_1, \text{ chekli } U_I=0 & \text{I soha} \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi_2}{dx^2} &= U_0 \psi_2 = E \psi_2 \text{ chekli } U_{II}=U_0 & \text{II soha} \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi_3}{dx^2} &= E \psi_3 \text{ chekli } U_{III}=0 & \text{soha} \end{aligned} \quad (24)$$

Belgilashlar kiritamiz :

$$\alpha^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E \quad \text{va} \quad \beta^2 = \frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2} \quad (25) \quad \text{va} \quad (24) \quad \text{ni quydagi shakilda}$$

yozamiz:

$$(26) \quad \begin{cases} \frac{d^2 \psi_1}{dx^2} + \alpha^2 \psi_1 = 0 & \text{I soha} \\ \frac{d^2 \psi_2}{dx^2} - \beta^2 \psi_2 = 0 & \text{II soha} \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d^2 \psi_3}{dx^2} + \alpha^2 \psi_3 = 0 & \text{III soha} \end{cases}$$

Bu tenglamalarning echimlari quydagi funksiyalar bo'ladi:

$$\begin{cases} \psi_1 = Ae^{i\alpha x} + Be^{-i\alpha x} & I - \text{soha} \\ \psi_2 = Fe^{-\beta x} + Ge^{\beta x} & II - \text{soha} \\ \psi_3 = Ce^{i\alpha x} + De^{-i\alpha x} & III - \text{soha} \end{cases}$$

Bunada A,B,C,F,D-lar har bir to'liqiga mos keluvchi amplitudalar

- A- To'siqqa chap tomondan tushayotgan amplitude
- B- I-sohadan qaytgan to'liqin amplitudasi
- F- II-soxada o'tgan to'liqin amplitudasi
- G- II soxada A nuqta sirtidan qaytgan to'liqin amplitudasi
- C- III soxada o'tgan amplitudasi
- D- III soxadan qaytgan to'liqin (mavjut bo'lmagan) amplitudasi.

Rasimdan ko'rinib turibdiki, uchchala soxada to'liqin funksiyasi uzliksiz ko'rinishda chizdik bundan chiqadiki, u x- o'qining istalgan nuqtasida to'liqin funksiya uzluksiz va bir qiymatli. Bu shartlarni bajarish natijasida tenglamani echgan holda turli amplitudalarni zarraning energiyasi, to'liqinning balandligi va qalinligi orqali bog'lash mumkin.

To'liqin funksiya bilan bog'langan ehtimol zichligi ushbu funksiya amplitudasining kvadratiga proporsanal bo'lgani to'siq uchun o'tish koefsenti yoki to'siqning shafofligini aniqlash mumkin.

$$D = \frac{|C|^2}{|A|^2} \quad (28) \quad x=0 \text{ nuqtada to'siq sirtidan qaytish koefsenti esa}$$

$$R = \frac{|B|^2}{|A|^2} \quad (29) \text{ formula bilan aniqlanadi } U > E \text{ hol uchun o'tish}$$

kaefsenti

$$D = 16 \frac{E}{U_0} \left(\frac{E}{U_0} \right) \exp - \frac{2l}{\hbar^2} \sqrt{2m(U_0 - E)} \quad (30) \text{ 1-to'siqning fazoviy}$$

qalinligi. (30) dan ko'rinib turibdiki to'la energiya E bo'lgan mikro zarra yupqa energetic to'siqqa tushayotgan bo'lsa va to'siqning patensial E dan katta bo'lsa ham zarraning to'siqdan o'tish ehtimoli mavjutligi kelib chiqadi.

Ihtiyoriy shakildagi patensial to'siqdan o'tish koefsentini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin.

$$D = \exp \left[- \frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(U(x) - E)} dx \right] \quad (31)$$

Bu masalani echishda zarra potensial to'siqdan o'tishda o'z energiyasini yo'qotmaydi deb hisoblaymiz va to'siqdan o'tishda vaqt

o'tayotgan zarralarning soni kamayadi. Bu hodisaga tunnel effekti deyiladi.