

Lecture №3.

ENERGY ZONES.

3-MA'RUZA:

ENERGETIK ZONALAR.

REJA:

3.1. Energetik zonalar.

3.2. Yarim o'tkazgichlarda xususiy elektr o'tkazuvchanlik.

3.3. Yarim o'tkazgichlarda kiritmali elektr o'tkazuvchanlik.

Tayanch iboralar: yarimo'tkazgichlar; energetik zonalar; o'tkazgichlar; elektr o'tkazuvchaanlik; ta'qiqlangan zona, erkin elektronlar; fermi sathi; zaryad tashuvchi.

3.1. Energetik zonalar

Zamonaviy elektronika qurilmalari yarim o'tkazgichli materiallardan tayyorlanadi. Yarim o'tkazgichlar kristall, amorf va suyuq bo'ladi. Yarim o'tkazgichli texnikada asosan kristall yarim o'tkazgichlar (10^{10} asosiy modda tarkibida bir atomdan ortiq bo'lmagan kiritma monokristallari) qo'llaniladi. Odatda yarim o'tkazgichlarga solishtirma elektr o'tkazuvchanligi σ metallar va dielektriklar oralig'ida bo'lgan yarim o'tkazgichlar kiradi (ularning nomi ham shundan kelib chiqadi). Xona temperaturasida ularning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi 10^{-8} dan 10^5 gacha Sm/m (metrga Simens)ni tashkil etadi. Metallarda $\sigma = 10^6$ - 10^8 Sm/m, dielektrlarda esa

$\sigma = 10^{-8}$ - 10^{-13} Sm/m. Yarim o'tkazgichlarning asosiy xususiyati shundaki, temperatura ortgan sari ularning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi ham ortib boradi, metallarda esa kamayadi. Yarim o'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi yorug'lik bilan nurlantirish va hatto juda kichik kiritma

miqdoriga bog‘liq. Yarim o‘tkazgichlarning xossalari *qattiq jism zona nazariyasi* bilan tushuntiriladi.

Har bir qattiq jism ko‘p sonli bir-biri bilan kuchli o‘zaro ta’sirlashayotgan atomlardan tarkib topgan. Shu sababli bir bo‘lak qattiq jism tarkibidagi atomlar majmuasi yagona tuzilma deb qaraladi. Qattiq jismda atomlar bog‘liqligi atomning tashqi qobig‘idagi elektronlarni juft bo‘lib birlashishlari (valent elektronlar) natijasida yuzaga keladi. Bunday bog‘lanish *kovalent bog‘lanish* deb ataladi.

Atomdagi biror elektron kabi valent elektron energiyasi W ham diskret yoki kvantlangan bo‘ladi, ya’ni elektron *energetik sath* deb ataluvchi biror ruxsat etilgan energiya qiymatiga ega bo‘ladi. Energetik sathlar elektronlar uchun ta’qiqlangan energiyalar bilan ajratilgan. Ular *ta’qiqlangan zonalar* deb ataladi. Qattiq jismlarda qo‘shni elektronlar bir-biriga juda yaqin joylashganligi uchun, energetik sathlarni siljishi va ajralishiga olib keladi va natijada *ruxsat etilgan energetik zonalar* yuzaga keladi. Energetik zonada ruxsat etilgan sathlar soni kristaldagi atomlar soniga teng bo‘ladi. Ruxsat etilgan zonalar kengligi odatda bir necha elektron – voltga teng (elektron – volt – bu 1 V ga teng bo‘lgan potenciallar farqini yengib o‘tgan elektronning olgan energiyasi). Ruxsat etilgan zonadagi minimal energiya sathi tubi (W_c), maksimal energiya esa shipi (W_v) deb ataladi.

7-rasmda yarim o‘tkazgichning zona diagrammasi keltirilgan. Ta’qiqlangan zona kengligi ΔW_t yarim o‘tkazgichning asosiy parametri bo‘lib hisoblanadi.



7 – rasm. Yarim o‘tkazgichlarni zona diagrammasi.

Elektronikada keng qo‘llaniladigan yarim o‘tkazgichlarning ta‘qiqlangan zona kengliklari ΔW_t (eV) quyidagiga teng: germaniy uchun – 0,67, kremniy uchun – 1,12 va galliy arsenidi uchun -1,38.

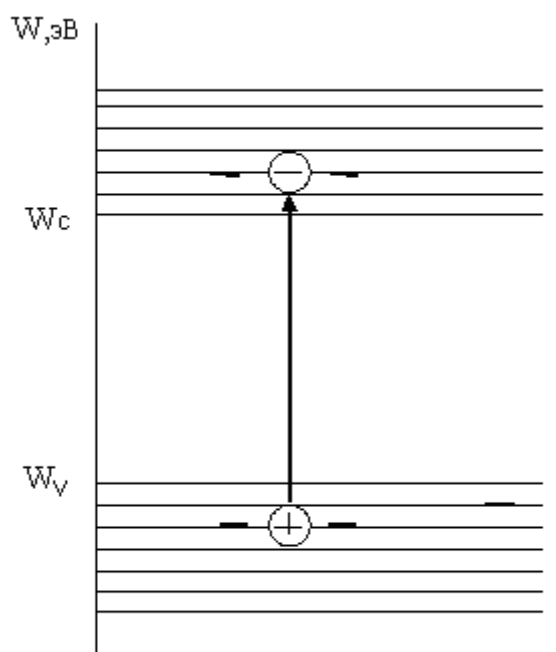
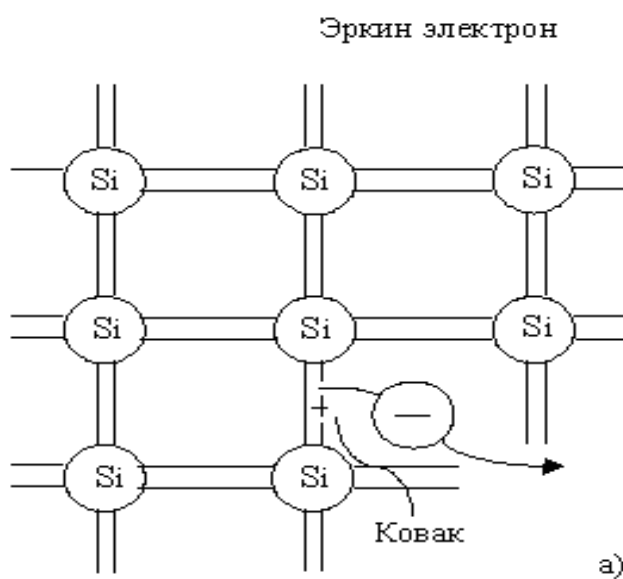
Dielektrlarda ta‘qiqlangan zona kengligi $\Delta W_t \geq 2$ eV, metallarda esa ruxsat etilgan zonalar bir – biriga kirib ketgan bo‘ladi, ya‘ni mavjud emas.

Yuqoridagi ruxsat etilgan zona ***o‘tkazuvchanlik zonasini*** deb ataladi, ya‘ni mos energiyaga ega bo‘lgan elektronlar, tashqi elektr maydoni ta‘sirida yarim o‘tkazgich hajmida harakatlanishlari mumkin, bunda ular elektr o‘tkazuvchanlik yuzaga keltiradilar. O‘tkazuvchanlik zonasidagi biror energiyaga mos keladigan elektronlar ***o‘tkazuvchanlik elektronlari*** yoki ***erkin zaryad tashuvchilar*** deb ataladilar. Quyidagi ruxsat etilgan zona ***valent zona*** deb ataladi.

Absolyut nol temperaturada (0 K) yarim o‘tkazgichning valent zonasidagi barcha sathlar elektronlar bilan to‘lgan, o‘tkazuvchanlik zonasidagi sathlar esa elektronlardan xoli bo‘ladi.

3.2. Yarim o‘tkazgichlarda xususiy elektr o‘tkazuvchanlik

Yarim o'tkazgichli elektronika maxsulotlarining deyarli 97 % kremniy asosida yasaladi. 8 – rasmda kiritmasiz kremniy panjarasining soddalashtirilgan modeli (a) va uning zona energetik diagrammasi (b) keltirilgan. Agar yarim o'tkazgich kristalli tarkibida kiritma umuman bo'lmasa va kristall panjaraning tuzulmasida nuqsonlar (bo'sh tugunlar, panjara siljishi va boshqalar) mavjud bo'lmasa, bunday yarim o'tkazgich xususiy deb ataladi va i harfi bilan belgilanadi.



b)

8 – rasm. Xususiy yarimo'tkazgichlar.

8 – rasmdan ko'rinib turibdiki, kremniy xususiy kristallida uning atomining to'rtta valent elektroni kremniyning qo'shni atomining to'rtta elektroni bilan bog'lanib, mustahkam sakkiz elektronli qobiq (to'g'ri chiziq) hosil qiladi. 0 K temperaturada bunday yarim o'tkazgichda erkin zaryad tashuvchilar mavjud bo'lmaydi. Lekin temperatura ortishi bilan yoki yorug'lik nuri tushirilganda kovalent bog'lanishlarning bir qismi uziladi va valent elektronlar o'tkazuvchanlik zonasiga o'tish uchun yetarlicha energiya oladilar (8 b-rasm).

Natijada valent elektron erkin zaryad tashuvchiga aylanadi va kuchlanish ta'sir ettirilsa, u tok hosil qilishda ishtirok etadi. Elektron yo'qotilishi natijasida atom musbat ionga aylanadi.

Bir vaqtning o'zida valent zonada bo'sh sath hosil bo'ladi va valent elektronlar o'z energiyalarini o'zgartirishlariga, ya'ni valent zonasining biror ruxsat etilgan sathidan boshqasiga o'tishiga imkon yaratiladi. Shunday qilib, u tok hosil bo'lish jarayonida qatnashishi mumkin. Temperatura ortgan sari ko'proq valent elektronlar o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadilar va elektr o'tkazuvchanlik ortib boradi.

Valent zonadagi erkin energetik sath yoki erkin valent bog'lanish qovakli deb ataladi va u elektron zaryadining absolyut qiymatiga teng bo'lgan erkin musbat zaryad tashuvchi hisoblanadi. Kovakning harakatlanishi valent elektroni harakatiga qarama – qarshi bo'ladi.

Shunday qilib, atomlar orasidagi kovalent bog'lanishning uzilishi bir vaqtning o'zida erkin elektron va elektron ajralib chiqqan atom yaqinida kovak hosil bo'lishiga olib keladi. Elektron – kovak juftligining hosil bo'lish jarayoniga ***zaryad tashuvchilar generatsiyasi*** deb ataladi. Agar bu jarayon issiqlik ta'sirida amalga oshsa, u issiqlik generatsiyasi deb ataladi. O'tkazuvchanlik zonasida

elektronning hosil bo'lishi va valent zonasida kovakning yuzaga kelishi 8 b-rasmda mos ishoralar yordamida aylanalar ko'rinishida tasvirlangan. Strelka yordamida elektronning valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi ko'rsatilgan.

Generatsiya natijasida yuzaga kelgan elektronlar va kovaklar yarim o'tkazich kristallida yashash vaqti deb ataladigan biror vaqt mobaynida tartibsiz harakatlanadilar, so'ngra erkin elektron to'liq bo'lmagan bog'lanishni to'ldiradi va bog'lanish hosil bo'ladi. Bu jarayon *rekombinatsiya* deb ataladi.

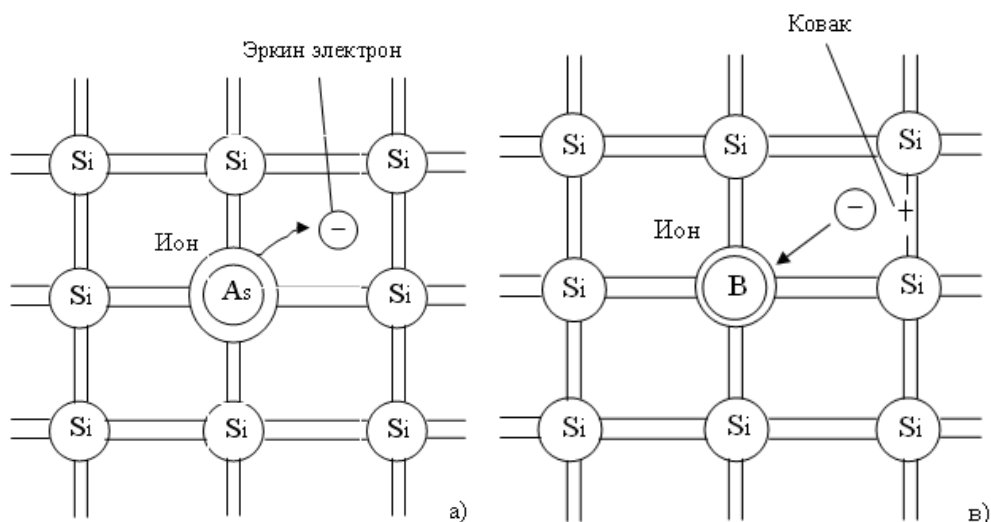
O'zgarmas temperaturada (boshqa tashqi ta'sirlar mavjud bo'lmaganda) kristall muvozanat holatda bo'ladi. Ya'ni, generatsiyalangan zaryad tashuvchilar juftligi soni rekombinatsiyalangan juftliklar soniga teng bo'ladi. Birlik hajmdagi zaryad tashuvchilar soni, ya'ni ularning konsentratsiyasi, solishtirma elektr o'tkazuvchanlik qiymatini beradi. Xususiylar yarim o'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasi kovaklar konsentratsiyasiga teng bo'ladi ($n_i = p_i$). n (negative so'zidan) va p (positive so'zidan) harflari mos ravishda elektron va kovakka mos keladi. Kiritmasiz yarim o'tkazgichda hosil bo'lgan elektron va kovaklar *xususiy erkin zaryad tashuvchilar* va ularga asoslangan elektr o'tkazuvchanlik esa – *xususiy elektr o'tkazuvchanlik* deb ataladi.

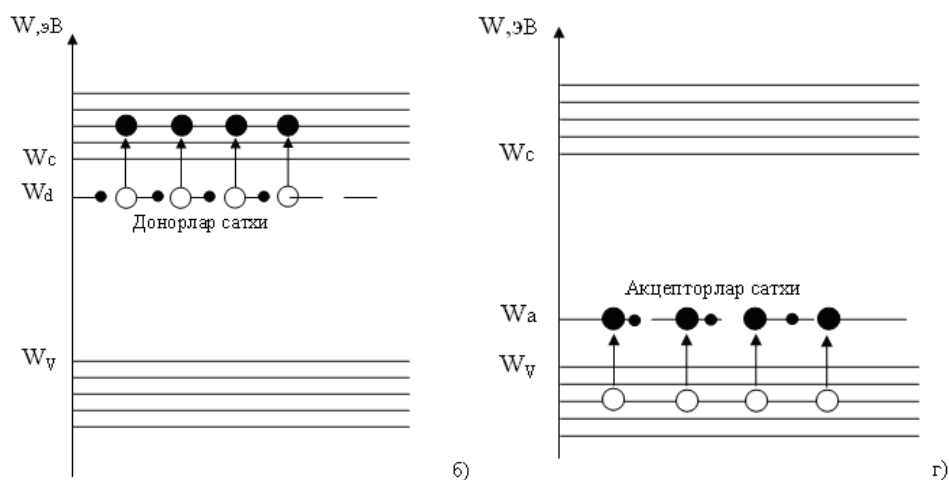
3.3. Yarim o'tkazgichlarda kiritmali elektr o'tkazuvchanlik

Yarim o'tkazgichli asboblarning ko'p qismi kiritmali yarim o'tkazichlar asosida yaratiladi. Elektr o'tkazuvchanligi kiritma atomlari ionizatsiyasi natijasida hosil bo'ladigan zaryad tashuvchilar bilan asoslangan yarim o'tkazgichlar – *kiritmali yarim o'tkazgichlar* deyiladi.

Kremniy atomiga D.I. Mendeleyev davriy elementlar tizimidagi V guruh elementlari (masalan, margumush As) kiritilsa uning 5ta valent elektronidan to'rttasi qo'shni kremniy atomining to'rtta valent elektronlari bilan bog'lanib - sakkiz elektrondan tashkil topgan mustahkam qobiq hosil qiladilar. Beshinchi elektron ortiqcha bo'lib, o'zining atomi bilan kuchsiz bog'langan bo'ladi. Shuning uchun kichik issiqlik energiyasi ta'sirida u uziladi va erkin elektronga aylanadi (9 a - rasm), bu vaqtda kovak hosil bo'lmaydi. Energetik diagrammada bu jarayon elektronning donor sathi W_d dan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishiga mos keladi (9 b - rasm). Kiritmali atom musbat zaryadlangan qo'zg'almas ionga aylanadi. Bunday kiritma **donor** deb ataladi.

Yarim o'tkazgichli asboblarda yasashda ko'p kiritma atomlari kiritiladi (1 sm³ hajmga 10¹⁴-10¹⁸ darajadagi atomlar). Xona temperaturasida kiritmaning har bir atomi bittadan erkin elektron hosil qiladi. Kovaklar esa xususiy yarim o'tkazichlardagi kabi kremniy atomi elektronlarining o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishidagi termogeneratsiya hisobiga hosil bo'ladi.





9 – rasm. Kiritmali yarim o‘tkazgichlar

Yarim o‘tkazgich tarkibiga katta darajadagi donor kiritmaning kiritilishi erkin elektronlar konsentratsiyasini oshiradi, kovaklar konsentratsiyasi esa xususiy yarim o‘tkazgichdagiga nisbatan sezilarli kamayadi. Erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ko‘paytmasi $n \cdot p$ o‘zgarmas temperaturada o‘zgarmas qoladi va faqat yarim o‘tkazgich ta‘qiqlangan zona kengligi bilan aniqlanadi. Shuni yodda tutish kerakki, $T=300 \text{ K}$ (xona temperaturasida) kremniyda $np \cong 0,64 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$, germaniyda esa $np \cong 4 \cdot 10^{26} \text{ sm}^{-3}$. Shunday qilib, agar kremniy kristalliga konsentratsiyasi 10^{16} sm^{-3} bo‘lgan donor kiritma kiritilsa, $T=300 \text{ K}$ da elektronlar o‘tkazuvchanligi $n=10^{16} \text{ sm}^{-3}$, kovaklarniki esa – atigi 10^4 sm^{-3} ga teng bo‘ladi. Demak bunday kiritmali yarim o‘tkazgichda elektr o‘tkazuvchanlik asosan elektronlar hisobiga amalga oshiriladi, yarim o‘tkazgich esa – **elektron** yoki ***n-turdagi elektr o‘tkazuvchanlik*** deb ataladi. n – turdagi yarim o‘tkazgichda elektronlar - asosiy zaryad tashuvchilar, kovaklar esa - asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar deb ataladi.

Kremniy atomiga D.I. Mendelejev davriy elementlar tizimidagi III guruh elementlari (masalan, bor V) kiritilsa uning valent elektronlari qo‘shni kremniy

atomlari valent elektronlari bilan uchta to‘liq bog‘liqlik hosil qiladilar. To‘rtinchi bog‘lanish esa to‘lmay qoladi. Uncha katta bo‘lmagan issiqlik energiyasi ta’sirida qo‘shni kremniy atomining valent elektronlari bu bog‘lanishni to‘ldiradi. Natijada borning tashqi qobig‘ida ortiqcha elektron hosil bo‘ladi, ya’ni u manfiy zaryadga ega bo‘lgan qo‘zg‘almas ionga aylanadi. Kremniy atomining to‘lmagan bog‘lanishi – bu kovakdir (1.3 v - rasm). Energetik diagrammada bu jarayon elektronning valent zonadan akseptor sathi W_a ga o‘tishiga va valent zonada kovak hosil bo‘lishiga mos keladi (1.3 g - rasm). Bu vaqtda erkin elektron hosil bo‘lmaydi. Bunday kiritma – akseptorli deb ataladi, akseptor atomlari kiritilgan yarim o‘tkazgich esa – *kovak* yoki *r – turdagi elektr o‘tkazuvchanlik* deb ataladi. R-turdagi yarim o‘tkazgich uchun kovaklar – asosiy zaryad tashuvchilar, elektronlar esa - asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar hisoblanadi.

Fermi sathi. Berilgan temperaturada harakatchan va qo‘zg‘almas zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi Fermi sathi W_F holati bilan aniqlanadi. Bu sath bir elektronga mos keluvchi jismning o‘rtacha issiqlik energiyasiga mos keladi. Absolyut nol temperaturadan farqli temperaturada bu sathning to‘lish ehtimoli 0,5 ga teng.

Elektronlar va kovaklarning o‘rtacha issiqlik energiyasi yarim o‘tkazgich temperaturasi bilan aniqlanadi va kT ga teng, bu yerda k – Bolsman doimiysi, T – absolyut temperatura. Qattiq jismda zarrachalar harakatini ifodalaydigan Bolsman qonuniga asosan, n – yarim o‘tkazgichdagi energiyasi W_i kichik bo‘lmagan elektronlar quyidagiga teng:

$$n = n_n \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right), \quad (1.38)$$

bu yerda n_n – erkin elektronlarning to‘liq konsentratsiyasi. Xuddi shunday ifodalar kovaklarni energiya bo‘ylab taqsimotini ifodalaydi. (1.1) dan ko‘rinib turibdiki, zarracha energiyasining ortishi bilan, zarrachalar soni keskin kamayadi.

Ikkala ishoradagi erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi teng bo‘lgan xususiy yarim o‘tkazgichlar uchun Fermi sathi ta‘qiqlangan zonaning o‘rtasidan o‘tadi. Elektronli yarim o‘tkazgichda elektronlarning (butun yarim o‘tkazgichning) o‘rtacha energiyasi yuqori bo‘ladi, demak Fermi sathi o‘rtadan o‘tkazuvchanlik zonasi tubi tomonga siljiydi va donor kiritma konsentratsiyasi qancha yuqori bo‘lsa, shuncha o‘tkazuvchanlik zonasi tubi tomonga yaqinlashadi. R- turdari yarim o‘tkazgichda Fermi sathi ta‘qiqlangan zona o‘rtasidan valent zona shipi tomonga siljiydi va akseptor kiritma konsentratsiyasi qancha yuqori bo‘lsa, shuncha valent zonasi shipi tomonga yaqinlashadi.

Ba‘zi yarim o‘tkazgichli asboblarda (tunnel diodlari, tunnel teshilishli stabilitronlar) *ajralmagan yarim o‘tkazgichlar* qo‘llaniladi. Bunday yarim o‘tkazgichlarda Fermi sathi ruxsat etilgan zonalarda: elektronli yarim o‘tkazgich uchun – o‘tkazuvchanlik zonasida, kovakli yarim o‘tkazgich uchun – valent zonada joylashadi. Ajralmagan yarim o‘tkazgichlar juda katta kiritma konsentratsiyasi ($10^{19} - 10^{21} \text{ sm}^{-3}$) hisobiga hosil qilinadilar.

Zaryad tashuvchilar harakatchanligi. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi μ - bu elektr maydon kuchlanganligi $\vec{E} = 1 \text{ V/sm}$ bo‘lgandagi yarim o‘tkazgichdagi zaryad tashuvchilarning o‘rtacha yo‘naltirilgan tezligi. Elektronlar hrakatchanligi μ_n doim kovaklar harakatchaligi μ_p dan yuqori bo‘ladi. Bundan tashqari zaryadlar harakatchanligi yarim o‘tkazgich turiga ham bog‘liq bo‘ladi. Shunday qilib, kremniydagi elektronlar harakatchanligi $\mu_n = 1500 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, germaniyda $\mu_n = \text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, galliy arsenidida $\mu_n = \text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Agar yarim o'tkazgichda elektr maydoni hosil qilinsa, u holda erkin zaryad tashuvchilar siljishi yuzaga keladi. Bunday siljish *dreyf harakati* deb ataladi.

Dreyf tezligi \vec{v}_{DP} elektr maydon kuchlanganligi \vec{E} ga proporsional bo'ladi

$$\vec{v}_{DP} = \mu \cdot \vec{E} \quad (1.39)$$

Elektron va kovaklar dreyf tokining natijaviy zichligi

$$\vec{j}_{DP} = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (1.40)$$

Diffuziya koeffisienti. Yarim o'tkazgichda elektr toki hosil bo'lishiga faqat elektr maydoni emas, balki harakatchan zaryad tashuvchilar gradienti ham sabab bo'ladi. Yarim o'tkazgich hajmida teng taqsimlanmagan erkin zaryad tashuvchilar harakatining yo'nalishi *diffuziya harakati* deb ataladi.

Elektron va kovak diffuziya toklarining zichligi quyidagiga teng

$$\vec{j}_{n\text{diff}} = qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right); \quad \vec{j}_{p\text{diff}} = -qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right). \quad (1.41)$$

bu yerda q – elektron (kovak) zaryadi, D_n i D_p – mos ravishda elektron va kovak diffuziya koeffisientlari, dn/dx i dp/dx – mos ravishda elektron va kovak konsentratsiya grandientlari.

Dreyf va diffuziya harakati parametrlari o'zaro *Eynshteyn nisbati* bilan bog'langan

$$D_n = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \mu_n = \varphi_T \mu_n; \quad (1.42)$$

$$D_p = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \mu_p = \varphi_T \mu_p. \quad (1.43)$$

(1.4) ifodadagi proporsionallik koeffitsientlari $\varphi_T = kT/q$ potensial o'lcham birligiga teng (volt) va issiqlik potentsiali deb ataladi. Xona temperaturasida ($T=300$ K) $\varphi_T = 0,026$ V = 26mV.

Yashash vaqti τ . Zaryad tashuvchining yashash vaqti deganda uning generatsiyasidan rekombinatsiyasigacha bo'lgan vaqt tushuniladi. Yarim o'tkazgichning bu parametri yarim o'tkazgichli asboblarni (bipolyar tranzistorlardagi baza kengligi, maydoniy tranzistorlarda kanal uzunligi) konstruksiyalashda katta ahamiyatga ega. Yashash vaqtida zaryad tashuvchining diffuziya harakati natijasida diffuziya uzunligi deb ataluvchi, o'rtacha masofasi ma'lum L ga teng bo'lgan masofani bosib o'tadi.

Nazorat savollari.

1. Energetik zonalar deb nimaga aytiladi?
2. Yarim o'tkazgichlarda xususiy elektr o'tkazuvchanlik nima?
3. Yarim o'tkazgichlarda kiritmali elektr o'tkazuvchanlik nima?
4. Qattiq jism zona nazariyasi nima?
5. Kovalent bog'lanishni tushintiring?
6. Zaryad tashuvchilar generatsiyasi nima?
7. Rekombinatsiya nima?
8. Fermi sathini tushintiring?
9. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi deb nimaga aytiladi?