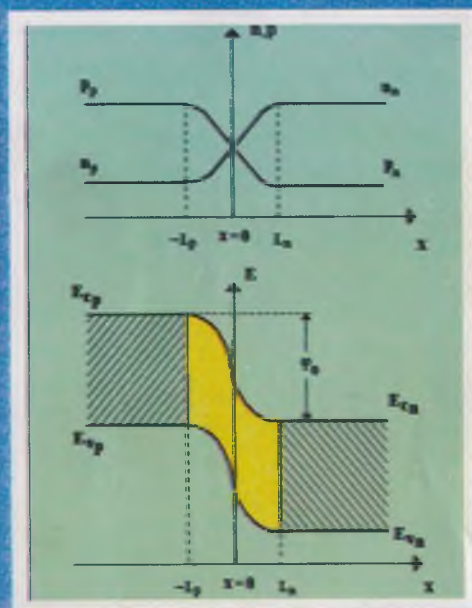


K.A. Tursunmetov, U.Q.Valiyev,
X.Yu. Mavlyanov, I.X. Xamidjonov

YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASIDAN MASALALAR VA SAVOLLAR TO'PLAMI



O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI
O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

K.A. Tursunmetov, U.Q.Valiyev, H.Yu. Mavlyanov, I.X. Xamidjonov

YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASIDAN
MASALALAR VA SAVOLLAR TO'PLAMI
(O'quv qo'llanma)

Toshkent
"Universitet"
2012

Ushbu qo'llanma yarimo'tkazgichlar fizikasining barcha bo'limlarini qamrovchi masalalar, shu jumladan elementar va 4 xil qiyinlik darajasidagi masalalar (qiyin masalalar yechimlari bilan), nazorat savollari va testlar to'plamidan iborat bo'lib, ta'limning barcha bosqichlarida (maktablar, akademik litsey, o'rta maxsus o'quv yurtlari, bakalavr va magistraturada) ta'lim olayotganlar uchun mo'ljallangan.

Fizika - matematika fanlari doktori, professor S.Z.Zaynobidinov tahriri ostida

Taqrizchilar: Toshkent Davlat Texnika universiteti professori N.F.Zikrillaev
O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti N.A.Nurmatov

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi oliy o'quv yurtlari o'quvchilari, fizika yo'nalishi (440000) va mutaxassisligi bo'yicha bakalavr (5440100 - fizika, 5440300 - astronomiya) va magistrari (5A440103 - yarimo'kazgichlar fizikasidan) uchun o'quv qo'llanma sifatida tavsiya etgan.

ISBN 978-9943-328-85-3



Kirish

Ushbu o'quv qo'llanma 4 xil qiyinlik darajasidagi savol, masala va testlar to'plamidan iborat. Birinchi va ikkinchi qiyinlik darajadagi savollar, mashqlar va masalalar to'plami elementar fizika hajmidagi vazifalar bo'lib, ular o'rta maxsus o'quv yurtlari o'quvchilari hamda yarimo'tkazgichlar fizikasidan masala yechishni o'rganmoqchi bo'lgan bakalavrlar uchun mo'ljallangan.

Uchinchi qiyinlik darajadagi masalalar esa fizika yo'nalishida ta'lim olayotgan bakalavrlarning mustaqil yechishlari uchun mo'ljallangan.

To'rtinchi qiyinlik darajadagi masalalar fizika yo'nalishida ta'lim olayotgan bakalavrlar hamda (fizika mutaxassisligi bo'yicha shug'illanayotgan) magistr'larga mo'ljallangan bo'lib, barcha masalalarning yechimlari keltirilgan.

Testlar to'plami bakalavr kursini bitiruvchilar hamda yarimo'tkazgichlar fizikasi mutaxassisligi bo'yicha magistraturaga kiruvchilar uchun mo'ljallangan.

Shu jumladan, yarimo'tkazgichlar fizikasining barcha bo'limlari bo'yicha nazorat savollari keltirilganki, ular shu kurs bo'yicha oraliq va yakuniy nazoratga tayyorlanish, magistratura va aspiranturaga kirishga tayyorgarlik ko'rishga imkon beradi.

O'quv qo'llanmadagi barcha savol, mashq va masalalarni ishlab chiqqan o'quvchilar yarimo'tkazgichlar fizikasining deyarli barcha bo'limlarini nazariy ham amaliy qayta ishlab chiqqan bo'ladi.

Shunday qilib, ushbu qo'llanma yarimo'tkazgichlar fizikasidan masala yechish bo'yicha universal qo'llanma bo'lib, o'rta maxsus o'quv yurtlari o'quvchilari, fizika yo'nalishida taqsil olayotgan bakalavrlar hamda yarimo'tkazgichlar fizikasi mutaxassisligi bo'yicha shug'illanayotgan magistr'larga va aspirantlarga mo'ljallangan.

Mualliflar o'quv qo'llanmaning yanada yaxshilanishiga qaratilgan taklif va mulohazalar uchun oldindan minnatdorchilik bildiradilar.

1 - QIYINLIK DARAJADAGI MASALALAR

- 1.1. Aralashma (kirishma) o'tkazgichlar va izolyatorlar qarshiligiga qanday ta'sir qiladi?
- 1.2. Temperatura o'zgaranda sof yarimo'tkazgichlar elektr qarshiligi qanday o'zgaradi?. Uiarda o'ta o'tkazuvchanlik kuzatiladimi?
- 1.3. Termistorning ishlash tamoyili nimaga asoslangan?
- 1.4. Sof yarimo'tkazgichlar qanday tok tashuvchi zaryadlarga ega?
- 1.5. Qanday sababga ko'ra elektron - kovak juftligi hosil bo'ladi?
- 1.6. Nima uchun tashqi sharoit o'zgaraganda elektron - kovak juftligi to'xtovsiz hosil bo'lib tursa ham ularning soni o'zgarmaydi?
- 1.7. Yarimo'tkazgichlarda kovakli o'tkazuvchanlik qanday hosil qilinadi? Elektron o'tkazuvchanlikchi?
- 1.8. Temperatura o'zgaranda yarimo'tkazgichlar qarshiligi qanday o'zgaradi?
- 1.9. Nima uchun erkin zaryad tashuvchilar p-n o'tishda ushlanib qolmaydi?
- 1.10. Nima uchun p-n o'tishda bir xil kuchlanish berilganda ham to'g'ri tok teskari tokka nisbatan katta bo'ladi?
- 1.11. Nima uchun yarimo'tkazgichli ventolni tokka to'g'ridan - to'g'ri nagruzkasiz ulab bo'lmaydi?
- 1.12. Nima uchun temperatura ortishi bilan p-n o'tishning tokni to'g'rilash xususiyati pasayadi?
- 1.13. Nima uchun tranzistorlarda baza kengligi kichik bo'lishi kerak?
- 1.14. Nima uchun tranzistor emitterida aralashma (kirishma) konsentratsiyasi bazanikiga qaraganda katta?
- 1.15. Qanday energiya hisobiga tranzistor signalni kuchaytiradi?
- 1.16. Mutloq sof o'tkazgichlar va dielektriklarning elektr qarshiligiga aralashmalar qanday ta'sir ko'rsatadi?
- 1.17. Termistorning ishlash prinsipini tushuntiring.
- 1.18. Zanjirning bir qismida o'tkazgich va yarimo'tkazgich parallel ulangan. Bu qismda kuchlanishni o'zgarmas deb hisoblab, o'tkazgich va yarimo'tkazgich qizdirilganda zanjir qismidagi kuchlanishlar qanday o'zgaradi?
- 1.19. Zanjirning bir qismida metall va yarimo'tkazgich ketma - ket ulangan. Bu qismda kuchlanishni o'zgarmas deb hisoblab, o'tkazgich va yarimo'tkazgich qizdirilganda zanjirdagi tok kuchi qanday o'zgaradi?
- 1.20. Sof yarimo'tkazgichda elektr zaryad tashuvchilari miqdori qanday nisbatda bo'ladi?
- 1.21. Yarimo'tkazgichlarda elektron - kovak jufti hosil bo'lishiga nima sabab bo'ladi?
- 1.22. Magniy va tellurning 20°C temperaturadagi solishtirma qarshiliklari mos holda $0,04 \cdot 10^6$ va $5000 \cdot 10^6 \Omega \cdot m$ ga teng. Bu ikki moddadan qaysi biri yarimo'tkazgich bo'ladi?

- 1.23. Kremniy absolyut nol temperaturaga yaqin temperaturagacha sovitilsa, u o'ta o'tkazuvchan bo'ladi mi?
- 1.24. Elektronlar va kovaklar o'zaro qo'shilish hodisasi nima deyiladi?
- 1.25. Nima uchun barcha tashqi sharoitlar bir xil bo'lganda elektron - kovak juftlari hosil bo'lishi uzluksiz davom etsa - da, yarimo'tkazgichdagi zaryad tashuvchi erkin elektronlar soni o'zgarmaydi?
- 1.26. Qanday usul bilan yarimo'tkazgichlarda elektron va kovakli o'tkazuvchanlik oshiriladi? 2. Fosfor, mishyak, surma, galliy, bor, indiy aralashmalaridan qaysi biri qo'shilganda germaniyli yarimo'tkazgichning elektron o'tkazuvchanligi va kovakli o'tkazuvchanligi ortadi?
- 1.27. Aralashmali yarimo'tkazgichlarning qarshiligi temperatura o'zgarishi bilan qanday o'zgaradi?
- 1.28. Nima uchun erkin zaryad tashuvchilar p-n - o'tish sohasida tura olmaydi?
- 1.29. Nima uchun p-n - o'tishda to'g'ri tok kuchi teskari tok kuchidan katta bo'ladi?
- 1.30. Past temperaturada kremniy va germaniyning elektr o'tkazuvchanligi qanday o'zgaradi?
- 1.31. Termistorlar uchun tok kuchi bilan qarshilik qanday bog'lanishda bo'ladi?
- 1.32. Termistor va fotorezistorning o'zaro farqi nimadan iborat?
- 1.33. Yarimo'tkazgichli kristal qanday o'tkazuvchanlikka ega?
- 1.34. Tranzistorda emitter, baza va kollektor toklari o'zaro qanday ifoda orqali bog'langan?
- 1.35. Radiotexnikada yarimo'tkazgichli asboblardan foydalanishning elektron lumpalardan afzalligi nimalardan iborat?
- 1.36. Nima uchun yarimo'tkazgichli ventilni o'zgaruvchan tok tarmog'iga yuk(nagruzka)siz ulash mumkin emas?
- 1.37. Nima uchun temperatura sezilarli o'zgarganda p-n- o'tishning to'g'rilash xususiyati keskin kamayadi? Germaniyli yarimo'tkazgich asboblardan qanday temperaturalarda foydalanish mumkin? Kremniyli asboblardan - chi?
- 1.38. Nima uchun tranzistor bazasining kengligi kichik bo'lishi kerak?
- 1.39. Nima uchun tranzistor emitteridagi aralashmalar konsentratsiyasi bazadagiga nisbatan yuqori bo'ladi?
- 1.40. Tranzistor kristalida qanday sohalar bor?
- 1.41. Tranzistorning emitter - baza va baza - kollektor qismida kuchlanish bi day orttirilganda kollektor zanjirida tok kuchi ham birday ortadimi?
- 1.42. Qanday energiya hisobiga tranzistordan kuchaytirilgan signal olinadi?
- 1.43. Tarkibidagi indiy va mish'yak elementlari miqdori (mol hisobida) bir xil bo'lgan InAs birikmani (indiy arsenidi) to'rtinchi guruh elementlari (Ge, Si) ning xususiy o'tkazuvchanligi kabi tipdagi o'tkazuvchanligi ortganda o'tkazuvchanlik qanday tipda bo'ladi? Mishyak konsentratsiyasi ortganda - chi?

1.44. Kerakli tipdagi aralashmali o'tkazuvchanlik olish uchun yarim-o'tkazgichlar texnikasida ko'pincha fosfor, galliy, mishyak, indiy, surma ishlatiladi. Elektronli o'tkazuvchanlik olish uchun bu elementlardan qaysi birini aralashma sifatida germaniyga qo'shish mumkin?

1.45. Nima uchun jajji yarimo'tkazgichli radiopriyomnikni tranzistor deyish noto'g'ri?

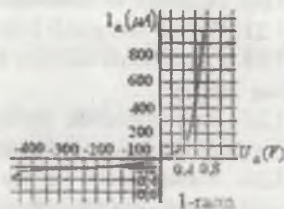
2 - qiyinlik darajadagi masalalar

2.1. Fotoqarshilikning qorong'ilikdagi qarshiligi $1,0 \cdot 10^{10} \Omega$, yoritilgandagisi esa $2 \cdot 10^4 \Omega$. Fotoqarshilikka 50 V kuchlanish berilgan bo'lsa, yoritilganda fototok qancha bo'ladi.

2.2. Kuchlanishi 16 V bo'lganda qorong'ilikda fotoqarshilikda 1,6 mA, ma'lum darajada yoritilganda esa 2,0 mA tok bo'lgan. Fotoqarshilikning yoritilmagan vaqtdagi va shu berilgan yoritilganlikdagi volt - amper xarakteristikasini birgina o'qlarda chizing. Kuchlanish 5 V; 10 V bo'lganda fototok kattaligini grafikdan ko'rsating.

2.3. Fotoelementni sport yugurish yo'li finishida ishlatish sxemasini tuzing.

2.4. 1-rasmda germaniyli diod DG-S - 27 orqali o'tuvchi tokning kuchlanishga bog'liq bo'lish grafigi berilgan. Xarakteristikaning qaysi qismi tok bilan kuchlanish orasidagi bog'lanishni aks ettiradi? Qaysi qismi berk yo'nalishdagi bog'lanishni ko'rsatadi? Kuchlanish 0,4 V va teskari kuchlanish 400 V bo'lganda diodning ichki qarshiligini toping.



2.5. Yerning sun'iy yo'ldoshlarida yarimo'tkazgichli quyosh elektr batareyalari o'rnatiladi. Yo'ldoshning Yer atrofida bir marta aylanishi davomida shunday batareyaning $1m^2$ sirtidan olinadigan elektr energiya o'rtacha miqdori aniqlansin. Quyosh energiyasi oqimining zichligi $1 \frac{kW}{m^2}$, issiqlik nurlanishi oqimning 60% ini tashkil etadi. Batareyaning F.I.K. 10%, yo'ldoshning aylanish davri 102 min. Yo'ldosh Yer atrofida aylanish vaqtining $\frac{2}{3}$ qismi davomida quyosh nuri bilan yoritiladi.

2.6. Nega temperatura ortishi bilan elektrolitlar va yarimo'tkazgichlarning qarshiligi kamayadi?

2.7. Kremniyni mutloq noi temperaturagacha qizdirilganda, u o'ta o'tkazuvchan bo'ladimi, yo'qmi?

2.8. Yarimo'tkazgichni qizdirish natijasida uning qarshiligi 20% kamaydi. Tok kuchi necha foizga o'zgaradi?

2.9. 20°C temperaturada germaniydagi elektronlar konsentratsiyasi $1.0 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$. Atomlarning umumiy miqdori $5 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa ularning qancha miqdori ionlashgan? O'rtta hisobda har bir atomdan bittadan valent elektroni ajraladi.

2.10. Ionlashgan atomlari $2 \cdot 10^{-6}\%$ ni tashkil qilgan germaniyda o'tkazuvchan elektronlar konsentratsiyasi qanchaga teng? O'rtta hisobda har bir atomdan bittadan valent elektroni ajraladi.

2.11. Germaniy monokristaliga fosfor kiritildi; uning miqdori massa bo'yicha $10^{-4}\%$ ni tashkil qiladi. Bu aralashma natijasida zaryad tashuvchilar miqdori qanchaga o'zgaradi? Barcha fosfor atomlari ionlashmoqda deb hisoblansin.

2.12. Kremniyda kovaklar konsentratsiyasi $5,0 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lishi uchun unga qancha miqdorda (massa % hisobida) alyuminiy qo'shish kerak? Alyuminiyning har bir atomi kovaklashishda ishtirok etadi.

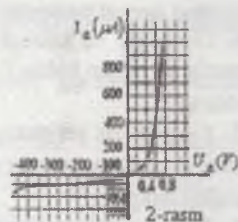
2.13. To'rt valentli germaniy quyidagi moddalar kiritildi: 1) Besh valentli mishyak 2) Uch valentli indiy. Germaniyda asosiy tok tashuvchilar har bir hol uchun qanday bo'ladi: elektronlarni yoki kovaklarni?

2.14. Germaniyga quyidagi moddalar kiritilganda u qanday o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi: fosfor, rux, kaliy?

2.15. Agar germaniy yoki kremniyga qalay eritilib kiritilsa, p-n o'tish hosil bo'ladimi?

2.16. Xususiy o'tkazuvchanliklarda elektronlar va ko-vaklar konsentratsiyasi bir xil bo'lishiga qaramasdan elektron tok kovak tokidan katta bo'ladi. Buni tushuntiring.

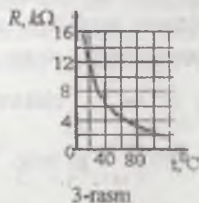
2.17. 1) 2-rasmda germaniyli diodning (DG-S-27) volt-ampere xarakteristikasi berilgan.



Xarakteristikaning qaysi qismida tokning kuchlanishga bog'lanishi to'g'ri yo'nalishda, qaysinisida teskari yo'nalishda?

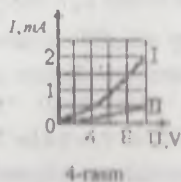
2) Nima uchun yarimo'tkazgichli diodning volt-ampere xarakteristikasida to'g'ri va teskari toklarni bir xil masshtabda chizish qulay emas?

2.18. 3-rasmda termistorning temperaturaviy xarakteristikasi ko'rsatilgan. Kuchlanish tushuvi 18 V bo'lganda termistordagi tok kuchini aniqlash uchun milliampermetr o'lchash chegaralari qanday bo'lishi kerak? Qanday temperaturalarda milliampermetr 10mA, 5 mA, 2mA larni ko'rsatadi?



2.19. Nima uchun metallarning qarshiligi nurlanish ta'sirida o'zgarmaydi?

2.20. 4-rasmda yoritilgan (I-grafik) va yoritilmagan (II-grafik) fotoqarshilikning volt - ampere xarakteristikasi keltirilgan. Qaysi holda fotoqarshilikning qarshiligi katta? Shu berilgan fotoqarshilik uchun Om



qonuni o'rinlimi?

2.21. Quyoshdan Yerga 1 minutda yetib keladigan energiya miqdori $\approx 7500 J/m^2$ ga teng. Quvvati 100 W bo'lgan quyosh yarimo'tkazgichli elektr batareyasining yuzasi qanday bo'lishi kerak? Batareyaning F.I.K. i 20 %.

2.22. Ketma - ket ulangan termistor va qarshiligi $1k\Omega$ bo'lgan reostatdan iborat zanjirning uchlariga 20 V kuchlanish berildi. Uy temperaturasida zanjirdagi tok kuchi 5 mA bo'lib, agar termistor qaynoq suvga tushirilganda tok kuchi 10 mA bo'lsa, bunda termistorning qarshiligi necha marta o'zgargan bo'ladi?

2.23. Qorong'ida 25 k Ω qarshilikka ega bo'lgan fotorezistor 25 k Ω li rezistorga ketma - ket ulandi. Fotorezistor yoritilganda zanjirdagi tok kuchi 1,8 marta ortadi (o'sha kuchlanishda). Fotorezistorning qarshiligi necha marta kamaygan?

2.24. Agar selenli to'g'rilagichning bitta shaybasi 9 V kuchlanishga mo'ljallangan bo'lsa, 36 V kuchlanishni to'g'rilash uchun nechta shayba va ularni qanday ulash kerak?

2.25. Tajribalarda aniqlangan Xoll koeffitsiyentining qiymatlari a) $R = 2 \cdot 10^3 \frac{sm^3}{C}$; b) $R = 3,1 \cdot 10^2 \frac{sm^3}{C}$; c) $R = 6,2 \cdot 10^3 \frac{sm^3}{C}$ bo'lgan hollar uchun

kristaldagi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini aniqlang.

2.26. Germaniy va kremniydagi elektron va kovaklarning harakatchanligining qiymatlarini bilgan holda $T = 77$ va 300 K dagi diffuziya koeffitsiyentlari D_n ni hisoblang.

2.27. $T = 300K$ da germaniydagi elektronlarning o'rtacha yashash vaqti $2 \cdot 10^{-4} s$ ga teng. Avvalgi masalada aniqlangan D_n ning qiymatini bilgan holda diffuzion uzunlikni aniqlang.

2.28. Elektr o'tkazuvchanlikning to'la toki kovakli elektr o'tkazuvchanlik tokiga nisbatini quyidagi hollar uchun aniqlang: a) toza germaniy uchun; b) solishtirma qarshiligi $0,05 \Omega \cdot m$ bo'lgan; v) p- turdagi germaniy uchun. Xona temperaturasida toza germaniyda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi

$n = 2 \cdot 10^{13} sm^{-3}$, elektronlar harakatchanligi $\mu_n = 3900 \frac{sm^2}{V \cdot s}$, kovaklarniki

$\mu_p = 1900 \frac{sm^2}{V \cdot s}$ ga teng.

2.29. Germaniy monokristalida elektronlarning harakatchanligi $\mu_n = 3900 \frac{sm^2}{V \cdot s}$,

kovaklarniki $\mu_p = 1900 \frac{sm^2}{V \cdot s}$. Xususiy konsentratsiya $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} sm^{-3}$ ga teng deb,

uning xususiy elektr o'tkazuvchanligi σ_i , minimal o'tkazuvchanligi σ_{min} va maksimal solishtirma qarshiligi topilsin.

2.30. Induksiyasi $B_z = 1000Gs$ bo'lgan maydonga o'lchamlari: $\ell_x = 5sm$, $\ell_y = 0,5sm$ $\ell_z = 0,5sm$ bo'lgan namuna joylashtirilgan. Namunaga $U_x = 3,5mV$ kuchlanish qo'yilganda undan $I = 25mA$ tok o'tgan. O'lchangan Xoll

kuchlanishi 12 mkV bo'lsa, elektr o'tkazuvchanlik va zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi topilsin.

2.31. Kengligi $l=1 \text{ sm}$ va uzunligi $L=10 \text{ sm}$ bo'lgan ingichka plastinka ko'rinishidagi yarimo'tkazgich $B=0,2 \text{ T}$ induksiyali bir jinsli magnit maydonga joylashtirilgan. Magnit induksiyasi vektori plastinka tekisligiga tik. Plastinka uchlariga (L yo'nalishi bo'yicha) $U=300 \text{ V}$ doimiy kuchlanish qo'yilgan. Agar Xoll doimiysi $R_n=0,1 \text{ m}^2/\text{C}$, solishtirma qarshiligi $\rho=0,5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ bo'lsa, plastinkani yon tomonlaridagi Xoll potensiallar farqi U_n aniqlansin.

2.32. Kengligi $l=2 \text{ sm}$ bo'lgan yupqa kremniy plastinka induksiya chiziqlariga tik qilib, bir jinsli magnit maydoniga ($B=0,5 \text{ T}$) joylashtirilgan. Plastinka bo'ylab yo'nalgan $j=2 \text{ mA}/\text{mm}^2$ tok zichligida Xoll potensiallar farqi $U_n=2,8 \text{ V}$ bo'lib chiqdi. Zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi n aniqlansin.

3 - qiyinlik darajasidagi masalalar

3.1. Kub panjara uchun (211), (022), (002), (200) kristalografik tekisliklarni grafik ko'rinishida tasvirlang.

3.2. Qirrasiz bo'lgan kub panjarada ikkita qo'shni (hkl) tekisliklar orasidagi masofani aniqlang.

3.3. n -chi energetik zona kengligi uchun umumiy ifodani keltirib chiqaring.

Buning uchun $E_n = A_n + (-1)^n B_n \cos \varphi$, $A_n = \frac{h^2 n^2 \pi^2}{2ma^2} \left(1 - \frac{2}{p}\right)$ va $B_n = \frac{h^2 n^2 \pi^2}{2ma^2} - \frac{2}{p}$

ifodalardan foydalaning.

3.4. n va $(n+1)$ -chi taqiqlanmagan qo'shni zonalar orasida joylashgan taqiqlangan zona kengligi uchun umumiy ifodani keltirib chiqaring. Buning uchun avvalgi masaladagi E_n , A_n va B_n larning ifodalaridan foydalaning.

3.5. $r(\varepsilon^*) = r_0(\tau) \varepsilon^{\left(\frac{\tau-1}{2}\right)}$ ifodadan foydalanib, $\tau = \frac{r_{0L} \varepsilon^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon^2 + a^2}$ va $\tau = \frac{r_{0L} \varepsilon^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon^2 + a^2}$

ifodalarni mustaqil keltirib chiqaring.

3.6. $r(\varepsilon^*) = r_0 \varepsilon^{\left(\frac{\tau-1}{2}\right)}$ ifoda yordamida bir vaqtda ro'y beruvchi ikki sochilish mexanizmi uchun formulani keltirib chiqaring: a) akustik fononlarda va neytral aralashmalarda sochilish

b) Debay temperaturasidan kichik hol uchun aralashma ionlari va optik fononlarda sochilish.

3.7. Umumiy ifodalar $\sigma = \frac{8\pi\epsilon^2}{3m^2(2\pi\hbar)^3} (2m^*kT)^{\frac{3}{2}} \tau_{OL} \cdot F_0(\mu^*)$ va $u_{OL} = \frac{2(e)}{3m^*} \tau_{OL} \cdot \frac{F_0(\mu^*)}{F_{\frac{1}{2}}(\mu^*)}$

dan kuchli aynish bo'lgan hol uchun akustik sochilish formulasini keltirib chiqaring.

3.8. $\sigma_i = \frac{8\pi\epsilon^2}{3m^2(2\pi\hbar)^3} (2m^*kT)^{\frac{3}{2}} \tau_{OL} \cdot F_2(\mu^*)$ va $u_{OL} = \frac{2(e)}{m^*} \tau_{OL} \cdot \frac{F_2(\mu^*)}{F_{\frac{1}{2}}(\mu^*)}$ ifodalarda

$\mu^* \gg 0$ deb hisoblab, aynigan hol uchun aralashmalardagi sochilish jarayoni uchun σ_i va u_{OL} larning ifodasini toping.

3.9. Kuchli aynigan bo'lgan holda, sochilish mexanizmining qanday bo'lishidan qat'iy nazar, Xoll - faktorning birga tengligini isbot qiling. Buning uchun Xoll - faktor uchun umumiy ifodalar $A_L = \frac{3}{4} F_{\frac{1}{2}}(\mu^*) \cdot \frac{F_{\frac{1}{2}}(\mu^*)}{F_0(\mu^*)}$ va $A_T = \frac{3}{4} F_{\frac{1}{2}}(\mu^*) \cdot \frac{F_{\frac{1}{2}}(\mu^*)}{F_2(\mu^*)}$

dan foydalaning.

3.10. Elektronlar konsentratsyasi 10^{12} , 10^{17} va 10^{19} sm^{-3} bo'lgan n-turdagi germaniy uchun termo EYuK ining fonon tashkil etuvchisini hisoblang.

3.11. Tarkibida fosfor kirishmalarining konsentratsyalari 10^{18} , 10^{19} va 10^{20} sm^{-3} bo'lgan kremniydagi kremniy ionlarida sochilish natijasida hosil bo'ladigan termo EYuK ini hisoblang.

3.12. Termo EYuK ni o'lchash asosida elektr o'tkazuvchanlikning turini aniqlash imkoniyatlarini tahlil qiling.

3.13. Taqiqlangan bilvosita o'tishlar uchun $\alpha(\hbar\omega)$ ning ifodasini keltirib chiqaring. Buning uchun $f = f_0 + \frac{e\hbar}{m^*} \tau(k) k \frac{\partial f}{\partial E} \epsilon_0 e^{i\omega t}$, $\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$ va

$\alpha = \sum_i \alpha_i(\omega) = \sum \sigma_i(\omega) N$, ifodalardan foydalaning.

3.14. $\chi = n^2 - k^2 = \chi_0 - \frac{4\pi N e^2}{m^*} \frac{\tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$ va $\chi = \chi_0 - \frac{N e^2 \chi_{\text{min}}^2}{m^* c^2}$ ifodalardan

foydalanib $\left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^2 = \chi_0 - \frac{N e^2 \chi^2}{m^* c^2}$ ni o'rinli ekanligini isbot qiling.

3.15. Xona temperaturasida germaniyda nurlanish zonalararo rekombinasiyada zaryad tashuvchilarning yashash vaqti $8 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ ga teng. Zaryad tashuvchilarning konsentratsyasi $n = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$. Nurlanishli rekombinasiya koeffitsiyentini aniqlang. O'lchashdagi injeksiyani kichik deb hisoblang.

3.16. n - turdagi aralashmali (kirishmali) yarimo'tkazgichdagi elektronlarning muvozanatdagi konsentratsyasi $5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ga teng. Kichik injeksiyada nurlanishli rekombinasiya sharoitida elektronning yashash vaqti 10^{-2} s ga teng. Elektronlarning konsentratsyasi $2 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{17}$ va $7 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan hollar uchun elektronning yashash vaqtini baholang.

- 3.17. Xususiyy germaniyda nurlanishli yashash vaqtini temperaturaga bog'liqligini tahlil qiling. Injeksiya juda kichik va ko'effitsiyenti γ_0 temperaturaga bog'liq emas deb hisoblang.
- 3.18. Kovaklarning p- turdagi germaniyda nurlanishli yashash vaqtini temperaturaga bog'liqligini tahlil qiling. Galliy kirishmalarining konsentratsiyasi $2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$. Tahlilni $4K \leq T \leq 77K$ temperatura intervali uchun qiling.
- 3.19. Kremniydagi fosfor kirishmaning konsentratsiyasi $4 \cdot 10^{18}$ dan $8 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ ga ortganda, to'qnashish rekombinatsiyasi bo'lganda, zaryad tashuvchilarning yashash vaqti necha marta va qanday o'zgaradi?
- 3.20. Kub panjarali kristalning birinchi Brullyuen zonasida bir atomga 2 ta elektron to'g'ri kelishini ko'rsating.
- 3.21. Atomlari orasidagi masofalar a va $e=3a$ bo'lgan ikki o'lchamli sodda to'g'ri burchakli panjara uchun birinchi 4 ta Brullyuen zonasini grafigini chizing.
- 3.22. Geksagonal zich joylashgan (GZJ) monoatomli panjara strukturasi uchun Brullyuen zonasi olti burchakli prizma ko'rinishda bo'ladi. Bu prizmaning o'lchamlarini aniqlang. Panjara doimiysi a ga teng.
- 3.23. Qirrasini $2 \cdot 10^{-8} \text{ sm}$ bo'lgan oddiy kub panjara uchun deyarli erkin elektronlar yaqinlashishda $E(\vec{K}_{100})$ ni hisoblang. Bu yerda \vec{K}_{100} - Brullyuen zonasi markazi bilan (100) qirrali zonani tutashtiruvchi vektor.
- 3.24. InSe da taqiqlangan zona kengligi $\Delta E = 0,18 \text{ eV}$, $\epsilon = 17$ va $m^* = 0,014 m_0$. a) Donorlar ionizatsiya energiyasini; b) asosiy holatdagi orbita radiusini; s) qanday minimal donorlar konsentratsiyasidan boshlab, orbitalarning qo'shni aralashma orbitalari bilan qisman kesishi bilan bog'liq effektlar namoyon bo'ladi?
- 3.25. Qanday temperatura intervalida n-Ge ning elektronlar konsentratsiyasini $n = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ qiymatda stabil qilish mumkin? $n = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ dachi? Bu temperatura intervali kremniy uchun qanday bo'ladi? Aralashmalarining energiya aktivatsiyasi bir xil va $0,01 \text{ eV}$ ga teng deb hisoblang.
- 3.26. Eynshteyn nisbatini aynigan va aynimagan yarimo'tkazgichlar uchun keltirib chiqaring.
- 3.27. Germaniy va kremniy xususiyy yarimo'tkazgichlarda elektron va kovaklarning diffuziya ko'effitsiyentlarini jadvalini tuzing.
- 3.28. Elektron va kovaklar uchun bipolyar (biquib) diffuziya ko'effitsiyenti formulalarini keltirib chiqaring.
- 3.29. n- turdagi kremniy va germaniy yuzalarida kovaklarni qandaydir ortiqcha konsentratsiyasi doimiy saqlanadi. Namuna qalinligi bo'yicha ortiqcha yengil va oqir kovaklar taqsimoti qanday? (masalani bir o'lchamli deb hisoblang).
- 3.30. Erkin yugurish yo'lini vaqtga bog'liqligi yaqinlashuvida erkin zaryad tashuvchilarning o'rtacha erkin yugurish yo'li vaqtini aniqlang. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi 0,4 SI birligiga, massasi esa erkin elektronning massasiga teng deb hisoblang.
- 3.31. Yarimo'tkazgichlarning xususiyy elektr o'tkazuvchanligi $\sigma_0 = en_0(\mu_n + \mu_p)$ ko'rinishida yoziladi. Minimal elektr

o'tkazuvchanlik $\sigma_{sm} = 2en(\mu_n \cdot \mu_p)^{\frac{1}{2}}$ ko'rinishda ifodalanishini isbotlang. Bu

holda elektronlar konsentratsiyasi $n_e = n \left(\frac{\mu_p}{\mu_n} \right)^{\frac{1}{2}}$ va kovaklar konsentratsiyasi

$$n_p = n \left(\mu_n \cdot \mu_p \right)^{\frac{1}{2}} .$$

3.32. Yuzasi metall parda bilan qoplangan germaniy namunasining yuzasida qancha ichkariga kontakt maydonining kirishini aniqlang. Elektron konsentratsiyasi $n_0 = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, metall - germaniy kontaktida chiqish ishining farqi $0,3 \text{ eV}$ va $\varepsilon = 16$ (germaniy uchun).

3.33. Metall - yarimo'tkazgich kontaktida yarimo'tkazgichdan metalga o'tayotgan elektronlar tokini toping. Yarimo'tkazgichda elektronlarning yuza zichligi $n_s = 10^{13} \text{ sm}^{-3}$.

3.34. Donorlar konsentratsiyasi $N_D = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan n-kremniy va akseptorlar konsentratsiyasi $N_A = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan p-germaniy hosil qilgan p-n- o'tishdagi kontakt potensiallar farqini aniqlang. O'tishning geometriyasi to'g'rilanish diffuzion nazariyasini qanoatlantiradi. $T = 300 \text{ K}$ deb hisoblang.

3.35. Germaniyli yassi diodning p-n o'tish sohasini yuzi 1 mm^2 bo'lib, p-sohasi uchun $\rho_p = 0,1 \Omega \cdot \text{sm}$ va n-sohasi uchun $\rho_n = 2 \Omega \cdot \text{sm}$. Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti p-sohada $\tau_n = 100 \text{ mks}$ va n-sohada $\tau_p = 100 \text{ mks}$. Bu diod uchun to'yinish teskari tokini toping.

3.36. Ko'ndalang kesim yuzasi 1 mm^2 bo'lgan germaniyli p-n o'tishli dioddagi to'yinish tokining kovak tashkil qiluvchisini aniqlang. Kovaklarning n-sohadagi diffuziya uzunligi $0,005 \text{ sm}$, solishtirma elektr o'tkazuvchanligi $\sigma = 1000 \text{ Sim/m}$ va $T = 300 \text{ K}$ deb oling.

3.37. Elektron yarimo'tkazgich yuzasiga tik $E = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{sm}}$ kuchlanishli doimiy elektr maydoni qo'yilgan va unda yuza o'tkazuvchanligi $10^6 \Omega^{-1}$ ga teng bo'lganda yuza holatidagi zaryad aniqlansin. Yarimo'tkazgichning barcha joyida

$$\frac{e\phi}{kT} \ll 1 \text{ shart bajariladi va } n = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}, \varepsilon = 16, \mu_p = \mu_n = 3800 \frac{\text{sm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} .$$

3.38. Kovakli yarimo'tkazgich sirt potentsiali $|\phi_s| = 0,25 \text{ eV}$ bo'lsa, uning manfiy sirt zaryad zichligini aniqlang. Akseptorlar yarimo'tkazgich ichida (sirtidan ekranlashtirish uzunligidan kattaroq masofalarda) to'la ionlashgan va $n_p = 3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $\varepsilon = 16$, $T = 300 \text{ K}$ deb hisoblang.

3.39. Juda yupqa uzun plastinka (uzunligi ℓ va eni e , qalinligi $a = 0,25 \text{ mm}$), $\ell, e \gg a$ uchun yuza rekombinasiya tezligi S ni aniqlang. Plastinkadagi muvozanatda bo'lmagan zaryad tashuvchilarning effektiv yashash vaqti $\tau = 125 \text{ mks}$, hajmiy yashash vaqti $\tau_p = 250 \text{ mks}$, $\frac{S \cdot a}{D_p} \ll 1$ shart qo'llanilsin.

3.40. Aralashmalarning ionlarida sochilish asosiy bo'lgan bol uchun λ va μ orasidagi munosabatni keltirib chiqaring.

3.41. Germaniy $T=300K$ da elektronlarning harakatchanligi $\mu_n = T^{-1/2}$ qonuniyatga bo'ysunishi (eksperimental) aniqlangan. Shu temperaturalarda $p-n-p$ -tranzistorning baza orqali diffuziya natijasida tok zichligi aniqlansin. Emitterdagi ($x=0$) elektronlar konsentratsiyasi 10^{17} sm^{-3} va kollektordagisi ($x=10^{-3} \text{ sm}$) esa nolga teng.

3.42. $T=300K$ da o'tkazuvchanlik zonasida o'rtacha tezlik bilan harakatlanayotgan elektronlarning energiyasi, kvaziimpulsni, to'lqin vektori va to'lqin uzunligini aniqlang. Bunda $m_n^* = 0,37m$ deb hisoblang. Shu kattaliklarni to'lqin uzunligi elektronnikidan ikki marta katta bo'lgan, $6500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ tezlik bilan

harakatlanayotgan LA bo'ylanma akustik fononlar uchun aniqlang. Energiya va impuls saqlanish qonunlaridan bunday fonon elektronni qanday burchakka sochishini toping. Shu jumladan, elektron energiyasining o'zgarishini toping.

3.43. Sochilish germaniyda ionlashgan akseptor kirishmada ro'y berayotgan bo'lsa, markaziy to'qnashayotgan elektron sochuvchi markazga qanday minimal masofaga yaqinlashadi.

3.44. Kremniydagi aralashmaning ionlashgan atomlarida sochilayotgan elektronlarning effektiv sochilish kesimini aniqlang. Aralashma konsentratsiyasi $n_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ va uning sathi o'tkazuvchanlik zonasi tubidan $\Delta E_d = 0,01 \text{ eV}$ masofa joylashgan.

3.45. Elektronlarning birlik uzunlikdagi to'qnashuvlari soni effektiv kesim yuzasiga va erkin yugurish yo'li T^{-1} ga proporsional ekanligini ko'rsating. Yarimo'tkazgichlarda erkin elektronlarning o'rtacha kinetik energiyasi $\frac{3}{2}k_0T$ ga teng deb, $\mu \approx T^{\frac{3}{2}}$ ekanligini hisobga oling.

3.46. Sochilish aralashma atomlarida va panjara atomlarning tebranishlarida bir xil ahamiyatga molik bo'lgan hol uchun Xoll koeffitsiyentini hisoblash metodikasini keltiring.

3.47. Zaryad tashuvchilarning ikki xil turi bo'lgan holda Xoll koeffitsiyenti uchun $R = \frac{1}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}$ o'rinni bo'lishini isbot qiling va ikki: $n \gg p$, $n \ll p$

hollarni ko'ring.

3.48. $T=30K$ da aktivasiya energiyasi $0,05 \text{ eV}$ bo'lgan bor bilan legirlangan kremniyda kovaklarning Xoll harakatchanligi $50 \frac{\text{sm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$ ga teng. Shu temperaturalarda sochilish aralashmalar ionlarida bo'ladi deb hisoblab, $T=300K$ da kovaklar harakatchanligi $250 \frac{\text{sm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$ ga teng bo'lganda sochilish qanday bo'lishi aniqlansin.

3.49. Qandaydir yarimo'tkazgich uchun $\Delta E = 0,16 eV$, $T = 78 K$ va $120 K$ uchun Xoll koeffitsiyenti $R = +160 \frac{sm^{-3}}{K}$. $T = 78 K$ da solishtirma qarshilik $0,04 \Omega \cdot sm$, $T = 120 K$ da esa $0,076 \Omega \cdot sm$, termo EYuK koeffitsiyenti $T = 120 K$ da $520 \frac{mkV}{K}$, $T = 254 K$ da kuchsiz maydon Xoll koeffitsiyenti nolga aylanadi. Zaryad tashuvchilarning effektiv massasi $m^* = 0,07 m$. Shu namuna uchun $T = 254 K$ da kuchli magnit maydoni uchun kovaklarning effektiv massasi, akseptor aralashma konsentratsiyasi (kompensasiya yo'q deb), elektron va kovaklarning harakatchanligi, qarshiligi, termo EYuK va Xoll koeffitsiyenti aniqlansin.

3.50. Dreyf tezligini kuchli elektr maydonida o'zgarishi Om qonunini buzilishiga olib keladi. Maydonning qanday qiymatida germaniydagi tezlikning nisbiy o'zgarishi $\frac{\Delta g}{g}$ 13% ga teng bo'ladi. Elektronlarning harakatchanligi

$$\mu_n = 3900 \frac{cm^2}{V \cdot s}$$

3.51. Agar aktivlanish energiyasi $\Delta E_0 = 0,1 eV$ bo'lsa, xususiy elektr o'tkazuvchanlikli yarimo'tkazgichdagi Fermi sathi E_f aniqlansin. Elektronlar kinetik energiyasini hisoblashning nolinci sathi sifatida o'tkazish zonasini eng pastki sathi qabul qilinsin.

3.52. Xususiy elektr o'tkazuvchanlikli (germaniy) muayyan temperaturada $\rho = 0,48 \Omega \cdot m$ solishtirma qarshilikka ega bo'ladi. Agar elektronning va kovaklarning harakatchanliklari b_n va b_p lar mos ravishda $0,36$ va $0,16 \frac{cm^2}{V \cdot s}$ ga teng bo'lsa, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi n aniqlansin.

3.53. Aralashmali kremniyning solishtirma o'tkazuvchanligi $\sigma = 112 \frac{sim}{m}$. Agar Xoll doimiysi $R_n = 3,66 \cdot 10^{-4} m^3 / C$ bo'lsa, kovaklarning harakatchanligi μ_p va ularning konsentratsiyasi n_p aniqlansin. Yarimo'tkazgich faqat kovakli o'tkazuvchanlikka ega deb qabul qilinsin.

3.54. Germaniyda atomlarning bir qismi surma atomlari bilan almashtirilgan. Kiritilgan atomning qo'shimcha elektronini Bor modeli bo'yicha qarab, uning bog'lanish energiyasi E va orbitasining radiusi r baholansin. Germaniyning dielektrik singdiruvchanligi $\epsilon = 16$.

3.55. Temperaturasi $400 K$ bo'lgan xususiy yarimo'tkazgichda elektronlar zichligi $n = 1,38 \cdot 10^{15} sm^{-3}$. Elektron va kovaklarning effektiv massalari ko'paytnasini toping. Taqiqlangan zona kengligi $E_g = 0,785 \cdot 10^{-4} T (eV)$ qonuniyat bo'yicha o'zgaradi.

3.56. Energiyasi $E(k) = E_g + \frac{(\hbar k)^2}{2m}$ ifoda bilan aniqlangan bir o'lchovli, aynimagan elektron gazi uchun holatlar zichligi $g(E)$ topilsin.

3.57. Bor (B) atomi $N_a = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ miqdorda kiritilgan kremniydagi kovaklar zichligi topilsin. $T = 300 \text{ K}$, $m^* = 0.59 m_0$, $\mu_p = 100 \text{ sm}^2 \text{Vs}^{-1}$ va $g_0 = 1$. Bor atomlari uchun $E_f = +0,045 \text{ eV}$.

3.58. Yarimo'tkazgichdagi elektronlar zichligi $T = 400 \text{ K}$ da $n = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $T = 350 \text{ K}$ da $n = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa, taqiqlangan zona kengligi E_g ni aniqlang E_g temperaturaga chiziqli bog'langan deb hisoblang.

3.59. Toza germaniydagi elektronlari harakatchanligi $T = 300 \text{ K}$ da $\mu_n = 3800 \text{ sm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $m_n^* = 0,55 m_0$ va $\mu = aT^{-1/2}$ bo'lsa, germaniyaning $T = 30 \text{ K}$ dagi solishtirma qarshiligini toping. $E_g = 0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T$ qonuniyat bo'yicha o'zgaradi, $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 2,1$ va a doimiy kattalik deb olinsin.

4 - qiyinlik darajadagi masalalar

1. Yarimo'tkazgichlardagi elektronlar va kovaklar statistikasi.

Valent zonadagi kovaklar kotsentratsiyasi - p va o'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar konsentratsiyasi - n mos ravishda quyidagi ifodalar bilan aniqlanadi:

$$n = \frac{2}{(2\pi)^3} \int dk f_n(E_n(k)), \quad (1.1a)$$

$$p = \frac{2}{(2\pi)^3} \int dk f_p(E_p(k)) \quad (1.1b)$$

Bu yerda elektronlar va kovaklarning energiyalar bo'yicha taqsimot funksiyalarini integrallash Briyullen zonasi bo'yicha amalga oshiriladi. Ular quyidagi ifodalar yordamida aniqlanadi:

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{kT(E-E_f)}}, \quad f_p(E) = 1 - f_n(E) \quad (1.2)$$

bu yerda k - kvazi to'lqin vektori, $E_f = E_f - E_f$ - Fermi sathi, $E_n(k)$ ($E_p(k)$) - elektron (kovak) lar dispersiya qonuniyati. Valent zona tepasida va o'tkazuvchanlik zona (soha) tubi yaqinrog'ida $E_n(k)$ va $E_p(k)$ funksiyalarning xususiyatlari (1.1a) (1.1b) formulalar yordamida aniqlanishi muhimdir. Agar o'tkazuvchanlik zonasi mos kelsa bu nuqta (kub kristal panjarada) $k = 0$ dugi nuqti bo'lishi kerak. U holda aynimagan soha (zona) da

$$E_n(k) = E_s + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n}, \quad (1.3a); \quad \text{bu yerda } E_s \text{ va } m_n \text{ - lar o'zgarmas qiymatlar.}$$

Agar o'tkazuvchanlik zonasining tubiga Briyullen zonasidagi bir nechta nuqtalar mos kelsa, k^a (1,2.....) uchun (avvalgidek aynimagan zona uchun)

$$E_{n,a}(k) = E_s + \sum_{i=1,2,3} \frac{\hbar^2 (k_i - k_i^a)^2}{2m_i}, \quad m_i > 0 \quad (1.3b)$$

E_s - o'tkazuvchanlik zonasining tubiga to'g'ri keladi,

m_n -elektronlarning effektiv massasi.

(1.3b) anizotrop holatda m , effektiv massa tenzori komponentlari

$$m_x, m_y^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E_n(k)}{\partial k_x \partial k_j} \quad \text{larni bosh koordinata o'qlariga keltirilgan qiymatini}$$

bildiradi.

Bosh koordinata o'qlar sistemasida quyidagilarga ega bo'lamiz.

$$\begin{aligned} m_{xx} = m_x, \quad m_{yy} = m_y, \quad m_{zz} = m_z, \\ m_{xy} = m_{xz} = \dots = 0 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Xuddi shunga o'xshash ifodalar valent zonada elektronlar uchun ham yoziladi:

$$E_p(k) = E_s - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p} \quad (1.3v)$$

(1.3 v) izotrop holat uchun va

$$E_{pv}(k) = E_s - \sum_{i=x,y,z} \frac{\hbar^2 (k_i - k_i^*)^2}{2m_i} \quad (1.3g)$$

(1.3g) esa anizotrop holat uchun. Bu $E_s = E_s - E_p$ kattalik taqiqlangan zonaning kengligi deyiladi.

Aynigan (buzilgan) zonalar uchun (1.3a) va (1.3b) ifodalar mos kelmaydi, shuning uchun $E(k)$ ifoda yetarlicha murakkabroq ko'rinishda yoziladi.

Masalan, agar $k=0$ bo'lganda valent zonada 2 ta aynigan izotrop zonalar bo'lsa, zona chekkasiga yaqin joyda dispersiya qonuni quyidagi ko'rinishga keladi.

$$E_p(k) = E_s - \frac{\hbar^2}{2m_0} \left\{ Ak^2 \pm [B^2 k^4 + C^2 (k_x^2 k_y^2 + k_x^2 k_z^2 + k_y^2 k_z^2)]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (1.3d)$$

ifodadagi + ishora "engi!" - ishora esa "og'ir" kovaklarga tegishlidir, m_0 - vakuumdagi erkin elektronning massasi.

Tor taqiqlangan zonali qator yarimo'tkazgichlarda ekstremum biroz uzoqlashganda ham zonani noparabolikligi yetarlicha ta'sir qiladi. Agar parabolik holatlar 2 ta valent va o'tkazuvchanlik zonalarni o'zaro ta'siri deb faraz qilsak, boshqa zonalar yetarlicha uzoqda joylashgan bo'lib, qaralayotgan zonalardagi dispersiya qonunini taxminan quyidagicha ko'rinishda yozamiz:

$$E(k) = E_s + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} + \frac{1}{2} \left(\pm \sqrt{E_r^2 + \frac{8}{3} P^2 k^2} - E_r \right) \quad (1.3e)$$

Bu yerda + (belgisi) ishora o'tkazuvchanlik, - minus esa valent zonaga tegishlidir. Parametr P-zonalarni o'zaro ta'sirini bildiradi.(1.3e) dispersiya

qonuni Keyn tomonidan kiritilgan: $m(0) = \frac{3\hbar^2 E_r}{4P^2}$ ifoda zona chegarasi yaqinida effektiv massa qiymati, $m(0) \ll m_0$ bo'lganda quyidagi ifodani yozamiz:

$$E(k) = E_x + \frac{1}{2} \left(\pm \sqrt{E_x^2 + \frac{2\hbar^2 k^2 E_x}{m(0)}} - E_x \right) \quad (1.3j)$$

Tor taqiqlangan zonali bir qator yarimo'tkazgichlar uchun o'tkazuvchanlik zonasida yuqoridagi ifoda bilan xarakterlanuvchi dispersiya qonunini yetarlicha bajariladi.

Oddiy parabolik zona (1.3a) uchun elektronlar konsentratsyasi quyidagi ifoda bilan topiladi:

$$n = N_s F_{1/2}(\eta), \quad \eta = \frac{F - E_s}{kT} \quad (1.5),$$

bu yerda

$$N_s = 2 \left(\frac{m_s kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (1.6)$$

o'tkazuvchanlik zonasida holatlar effektiv zichligi deyiladi, $F_{1/2}(\eta)$ esa Fermi integralini bildiradi. Aynish kuzatilmaganda, (1,5) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$n = N_s e^{\eta} \quad (1.7)$$

Murakkabroq $E(k)$ bog'lanishlarda konsentratsya (1,5) va (1,6) ifodalar bilan beriladi, bu effektiv massa zichligining holati deyilib, m_n kattalik m_d ga almashtirib yoziladi. (1.3b) holat uchun

$$m_n = Q^{2/3} (m_e m_p m_d)^{1/3}, \quad (1.8)$$

bu yerda Q-o'tkazuvchanlik zonasidagi ekvivalent minimumlar soni (4-masalaga qarang).

Fermi sathini aniqlovchi asosiy munosabatlar vazifasini elektr neytrallik sharti bajaradi, ya'ni

$$p + \sum_j z_j N_j - n = 0 \quad (1.9)$$

bu yerda z_j - elektron zaryad birligidagi j sirdagi zaryadni bildiradi (ishorasi hisobga olingan holda), N_j - j sortli aralashma konsentratsyasi.

Aralashmali atomlar energetik sathlarining to'ldirilish darajasi quyidagi ifodalar bilan aniqlanadi:

$$\frac{N_d^0}{N_d^+} = g_d e^{\frac{F - E_d}{kT}}, \quad \frac{N_a^-}{N_a^0} = g_a e^{\frac{F - E_a}{kT}}, \quad (1.10)$$

bu erda $N_d^0(N_d^+)$ va $N_a^-(N_a^0)$ -lar neytral va zaryadlangan doner (akseptor) lar sonini bildiradi.

$g_d(g_a)$ -aynigan aralashmali sath faktorlari, $E_d(E_a)$ - doner (akseptor) larning aralashmali sathlar energiyalari.

Ifodadagi E_d, E_a , g_d va g_a -lar har birri alohida olingan holatda tajriba yordamida aniqlanadi. Oddiy ko'rinishda aralashma sathining nymishi elektronning epini bilan bog'liq bo'lgan holda aynish faktori 2 uchun birligi bo'ladi.

4.1. Aynimagan xususiy yarimo'tkazgichdagi Fermi sathining holati va temperaturaga bog'liqlik konsentratsyasi topilsin. Agar $E_g = (0,785 - \xi T)eV$ bo'lganda, temperatura 200 dan 300 K gacha o'zgarandagi elektronlar konsentratsyasi qanday o'zgaradi?

4.2. Xususiy yarimo'tkazgichdagi elektronlar konsentratsyasi 400 K temperaturada $1,38 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lgan. Agar taqiqlangan zonaning kengligi $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T)eV$ qonun bo'yicha o'zgarishi aniq bo'lsa, elektron va kovaklar effektiv massalarining ko'paytmasi topilsin.

4.3. Tekshirilayotgan yarimo'tkazgichdagi, Xoll effekti bo'yicha olib borilgan o'lchashlar 400° K temperaturadagi elektronlar konsentratsyasi $1,3 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ekanligi, 350° K temperaturada esa $6,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga tengligi aniqlanadi. Material taqiqlangan sohasining kengligi topilsin. Qaralayotgan material taqiqlangan sohasi temperaturaga bog'liq holda chiziqli qonun bo'yicha o'zgaradi.

4.4. Germaniy va kremniydagi elektronlar holatlar zichligining effektiv massasini va Fermi sathining konsentratsyaga bog'liqligini aniqlang. Q'tkazuvchanlik zonasidagi dispersiya qonuni (1,3b) ifoda bilan aniqlanadi. Ma'lumki, k - fazoda doimiy energiya sirti aylanuvchi ellipsoidga to'g'ri keladi, u germaniyda $Q=4$ ga teng, ko'ndalang massasi $m_t = 0,082 m_0$ bo'ylama massasi esa $m_l = 1,64 m_0$, kremniyda esa $Q=6$, $m_t = 0,19 m_0$, $m_l = 0,98 m_0$.

4.5. Valent zonadagi (1,3d) dispersiya qonunini qo'yidagicha yozish mumkin:

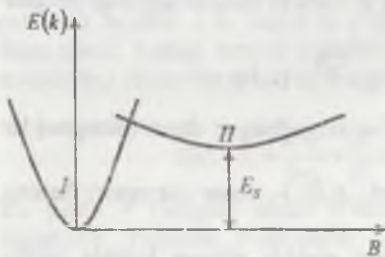
$$E(k) = E_g - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \left\{ A \pm B' \left[1 + \delta \cdot 6 \left(\frac{k_x^2 k_y^2 + k_x^2 k_z^2 + k_y^2 k_z^2}{k^4} - \frac{1}{6} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

bu yerda $B'^2 = B^2 + \frac{1}{6} C^2$, $\delta = \frac{C^2}{6B'^2}$, figurali qavslar ichidagi ifodaning son qiymati $\frac{1}{6}$ dan katta bo'la olmaydi.

δ -bo'yicha qatorga yoyishdan foydalanib, germaniydagi holatlar zichligining effektiv massalarini "engil" va "og'ir" kovaklar uchun baholansin (aniqlansin) ($A = 13,1$; $B = 8,3$; $C = 12,5$). xuddi shu kabi effektiv massa zichlik holati butun valent zonasi uchun topilsin.

4.6. Avvalgi masala natijalaridan foydalanib, germaniydagi yengil kovaklar hamma kovaklarning qanday qismini tashkil etishi aniqlansin.

4.7. Parabolik zonali xususiy yarimo'tkazgichdagi 600° K temperaturada



1- rasm

Fermi sathining holati va elektronlar konsentratsiyasi topilsin, agar taqiqlangan zonaning shu temperaturadagi o'zgarishi $E_g = (0,26 - 2,7 \cdot 10^{-4} T) eV$ qonunga bo'ysunsa, o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron gazining aynishi hisobga olinmagandagi xatolik baholansin, effektiv massalar $m_n = 0,1 m_0, m_p = 0,02 m_0$ ga teng deb va (ilova 4) dagi Fermi integralidan foydalanilsin. Aynish unchi kuchli emas deb olinsin.

4.8. Uy temperaturasida (300K) toza Ge dagi elektronlarning harakatchanligi $3800 \frac{cm^2}{V \cdot s}$. Bunday materialning shu temperaturadagi va 30 K dagi solishtirma

qarshiligi topilsin, elektronlar harakatchanligi $\mu = aT^{-\frac{3}{2}}$ deb olinsin, bu yerdagi a - doimiy (o'zgarmas son), elektronlarning effektiv massasi $0,56 m_0$, kovaklarniki esa $0,37 m_0$ ga teng, qaralayotgan hamma temperaturalar uchun taqiqlangan zonaning kengligi $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T) eV$ chiziqli qonun bo'yicha o'zgaradi, elektron va kovaklar harakatchanligining o'zaro nisbati $b = \frac{\mu_n}{\mu_p} = 2,1$

ga teng deb olinsin.

4.9. Arsenid galliyning o'tkazuvchanlik zonasidagi asosiy minimumdan biri Briyullen zonasining markazida yotadi, undan tashqari boshqa minimumlar ham mavjud bo'lib, ular E_2 dan yuqoriroq joylashgan (1-rasm) aynimagan elektron gazi uchun shu yarimo'tkazgichdagi va kuchli aynigan holat chegarasidagi Fermi sathining konsentratsiyasiga bog'liqligi topilsin. Boshqa zonalarning ta'siri hisobga olinmasin.

4.10. Arsenid galliyning yuqori minimum holatlaridagi aynigan holat hisobga olinmagan holda elektron gazining temperaturaga bog'liqligi hisobga olinib, to'ldirilishi hisobga olinsin. Yuqori minimumdagi elektronlar konsentratsiyasi n_0 ning asosiy minimumdagi elektronlar konsentratsiyasiga nisbati $300^0 K$ va $1000^0 K$ temperaturalar uchun nimaga teng bo'ladi? Elektronlar uchun effektiv massa zichlik holati (yuqori minimum holat uchun) $m_n = 15 m_1, E_1 = 0,35 eV$ larga teng deb, elektronlarning to'liq zichligini temperaturaga bog'liq emas deb qabul qiling.

4.11. Arsenid galliyni o'tkazuvchanligi elektron gaz temperaturasiga bog'liqligini tekshiring. Elektronlarning to'liq konsentratsiyasi va I, II minimum holatlardagi harakatchanligi temperaturaga bog'liq emas deb olinsin. O'tkazuvchanlikni o'zgarishini elektron gazining temperaturasi $300 K$ dan $1000 K$ gacha o'zgariganda qanday bo'lishligi hisoblansin. $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 50$ boshqa parametrlarning kerakli qiymatlari 4.10 masaladan olinsin.

4.12. Yarimo'tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasi, Fermi sathi aniqlansin. k ning kichik qiymatlari uchun elektronlar dispersiyasi $E_n(k) = E_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n} (1 - \gamma k^2)$,

bu yerda γ - doimiy son

4.13. n -tipli aynigan yarimo`tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasini Fermi sathi bilan bog`liqlik ifodasi aniqlansin. Dispersiya qonuni (1.3j) ifodadagidek deb qabul qilinsin.

4.14. Quyidagi

$$n = 2 \left(\frac{m_d kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} F_{1/2}(\eta)$$

ifodani dispersiya qonuni kvadratik qonundan farq qilgan holda m_d effektiv massani topish ifodasi deb qabul qilsak bo`ladi. Kuchli aynigan holat chegarasida, (1.3j) dispersiya qonuniga bo`ysunuvchi yarimo`tkazgich uchun m_d ni konsentratsiyaga bog`liqligi topilsin. Olingan ifodani xuddi shunga o`xshash $m^* \vartheta = \hbar K$ ifoda bilan aniqlanadigan m^* effektiv massa bilan solishtirilsin. Bu yerda ϑ - elektronning guruhiy tezligi, qaralayotgan dispersiya qonuni uchun m^* va m_d orasidagi munosabat aniqlansin.

4.15. N_D konsentratsiyali, bir tipli, bir valentli donorlardan tashkil topgan, aynimagan yarimo`tkazgich uchun Fermi sathining aralashmali soha uchun temperaturaga bog`liqligi o`rganilsin.

4.16. 10^{16} sm^{-3} konsentratsiyali surma bilan legirlangan germaniyning donor aralashmali sathi bilan mos tushuvchi Fermi sathi temperaturasi aniqlansin. (surma sath $E_d = E_S - 0,01 \text{ eV}$, g_d ni esa 2 ga teng deb olinsin). Shu temperaturadagi elektronlar konsentratsiyasi nimaga teng?

4.17. Bir turli, bir valentli donor aralashmali yarimo`tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasining temperaturaga bog`liqlik grafigi yasalsin. Tarkibida $2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ surma bo`lgan germaniyda uy temperaturasidagi tok tashuvchilar konsentratsiyasi qanday bo`ladi?

4.18. Shunday temperatura oralig`i topilsinki, unda elektronlar konsentratsiyasi doimiy (o`zgarmas) bo`lib, donorlar konsentratsiyasiga teng bo`ladi. Germaniy uchun interval chegarasi topilsin, germaniyni tarkibida $2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ donorlar mavjud, energetik sathi esa $E_d = E_S - 0,01 \text{ eV}$ taqiqlangan zonaning kengligi $E_g = \Delta - \xi T$, bu yerda $\Delta = 0,785 \text{ eV}$ va $\xi = 4 \cdot 10^{-4} \text{ eV/grad}$, aynish faktori 2 ga teng.

4.19. Xuddi yuqoridagiga o`xshash masala indiy antimonid uchun yechilsin, elektronning effektiv massasi $0,15m_0$, $\Delta = 0,26 \text{ eV}$, $\xi = 0,27 \cdot 10^{-4} \text{ eV/grad}$; $E_d = E_S - 0,001 \text{ eV}$; $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $g_d = 2$.

Zonaning noparabolikligi hisobga olinmasin.

4.20. Tarkibida N_d konsentratsiyadagi bir turdagi bir valentli donorlari bo`lgan aralashmali yarimo`tkazgichda Fermi sathining temperaturaga bog`liqlik grafigi aniqlansin (aynish ta`siri ham e`tiborga olinsin). Germaniy va antimonid indiyalar uchun donorlarning minimal konsentratsiyasi baholansin, bu holatda Fermi sathi o`tkazuvchanlik zonasida bo`ladi. Aynishni uncha katta emas ($\eta \leq 1,3$) deb, Fermi integralidan (ilova 4) foydalaniladi. Parametrlarni son qiymatlarini 4.18 va 4.19 masalalardan olinsin.

4.21. Bor bilan legirlangan ($N_a = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) kremniyning uy temperaturasida solishtirma qarshiligini va kovaklar konsentratsiyasini hisoblang. Kovaklar uchun holatlar zichligining effektiv massasi $m_{k_0} = 0,59 m_0$, harakatchanlik $\mu_k = 100 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $g_a = 1$, kremniydagi borning energetik sathi $0,045 \text{ eV}$.

Temperatura 30 K bo'lganda kovaklar konsentratsiyasi nimaga teng bo'ladi?

4.22. Qisman kompensasiyalangan namuna ($N_d > N_a$) dagi tok tashuvchilar konsentratsiyasini aynish hisobga olinmaganda aralashma oblastidagi temperaturaga bog'liqligi aniqlansin. $\ln n$ ning $\left(\frac{1}{T}\right)$ ga bog'lanishining quyi

temperaturaviy qismidagi og'maligini belgilovchi aktivasiya energiyasi nimaga teng?

4.23. Kuchli kompensasiyalangan ($N_d \approx N_a$) yarimo'tkazgichlardagi tashuvchilar konsentratsiyasini temperaturaga bog'liqligi ifodasi aniqlansin.

4.24. Germaniy surma va bor bilan legirlangan. Bor konsentratsiyasi 10^{16} sm^{-3} , kompensasiya darajasi $N_a/N_d = 0,5$ ga teng, aynish faktori 2 ga teng deb, 250 K temperaturadagi elektronlar konsentratsiyasi topilsin, agar $m_n = 0,56 m_0$, $E_d = E_s - 0,01 \text{ eV}$ bo'lsa.

4.25. Qisman kompensirlangan ($N_d > N_a$) yarimo'tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasini temperaturaviy grafigi ko'rsatilsin, yarimlogarifmik mashtabdan foydalangan holda grafik o'qlariga $\ln n$ va $\left(\frac{1}{T}\right)$ lar qo'yilsin.

4.26. Temperaturaning shunday sohasi topilsinki, unda qisman kompensirlangan yarimo'tkazgich ($N_d > N_a$) dagi elektronlar konsentratsiyasi o'zgarmas va $N_d = N_a$ ga teng bo'ladi. Konsentratsiyasi $2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan mishyak ($E_d = E_s - 0,05 \text{ eV}$) va $1,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyadagi alyuminiy bilan legirlangan kremniy uchun shunday soha chegarasi baholansin. Kremniydagi holatlar zichligining effektiv massasi elektronlar uchun $1,1 m_0$, taqiqlangan zonaning lengligi temperatura bo'yicha $E_p = (1,21 - 2,8 \cdot 10^{-4} T) \text{ eV}$ qonun bilan o'zgaradi, donorlar uchun aynish faktori 2 deb olinsin.

2. Yarimo'tkazgichlardagi zaryad tashuvchilar rekombinasiyasi.

Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini n_0 va p_0 larning qiymatlaridan oqib chiqishi natijasida issiqlik generatsiyasi orasidagi balans buziladi - bu bir tomondan, ikkinchi tomondan esa, lokal markazlarda tok tashuvchilar ushlab qolinadi. Elektron - kovaklar rekombinasiyasining absolyut tezliklari u_n va u_p noldan farqli bo'ladi va bu tezliklar tok tashuvchilarning natijaviy ushlanish soniga tengdir ($1 \text{ sm}^3, 1 \text{ sekunda}$)

$$-\left(\frac{\partial \Delta n}{\partial t}\right)_{rek} = u_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}; \quad -\left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t}\right)_{rek} = u_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}; \quad (2.1)$$

tengliklar bilan elektron va kovaklarning yashash vaqtlari aniqlanadi, ya'ni τ_n va τ_p nostasionar holatlarda umumiy holda, $\Delta n \approx \Delta p$ larga bog'liqdir. Shuningdek, agar zonalararo to'g'ridan - to'g'ri rekombinasiyalar ko'p bo'lsa, u holda

$$u_n = u_p = u = a(np - n_0 p_0). \quad (2.2)$$

Bu yerda a - doimiy.

Ko'p hollarda rekombinasiya panjara defektlarida erkin tok tashuvchilarni ushlab qolish bilan amalga oshadi (tutish markazlari yoki tuzoqlar), ular taqiqlangan zonalarda lokal energetik sathlarni hosil qiladi. Odatda aynimagan yarimo'tkazgichda N_t - konsentratsiyada bir turli ushlab qolish markazlari bo'ladi. Ular bitta E_t -lokal sathni beradi. Stasionar holatlar uchun quyidagi munosabat o'rinalidir:

$$u_n = u_p = u = N_t \frac{a_n a_p (pn - p_0 n_0)}{a_n (n + n_1) + a_p (p + p_1)} \quad (2.3)$$

Bu yerda

$$n_1 = N_s \exp \frac{E_t - E_s}{kT}, \quad p_1 = \frac{p_0 n_0}{n_1} = \frac{n_i^2}{n_1} \quad (2.4)$$

E_t ga tuzoqlarning aynishlarini hisobga oluvchi $kT \ln g$ ham kiritilgan (1.10) bilan solishtirib, α_n va α_p lar elektron va kovaklar ushlanish koeffitsiyentlari ifodalari ushlab qolish kesim yuzasi kattaligini ham kiritish foydali:

$$S_n = \frac{\alpha_n}{v_t}, \quad S_p = \frac{\alpha_p}{v_t} \quad (2.5)$$

Bu yerda $v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ erkin elektronning "issiqlik" tezligi, N_t konsentratsiya juda kichik bo'lganligi sababli elektronlarni tuzoqlardagi (lovushkalardagi) nomuvaznat konsentratsiyasini hisobga olmasa ham bo'ladi:

$$\frac{\Delta n_1}{\Delta p} = - \frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{N_t}{n_0 + n_1} \frac{a_n n_1 - a_p n_0}{a_p (p_0 + p_1) + a_n \left[n_0 + n_1 + \frac{N_t n_1}{n_0 + n_1} \right]} \quad (2.6)$$

Bu tok tashuvchilarni yopishib qolishi sodir bo'lmaydigan holatdir, u holda

$$\tau = \frac{\tau_{n0} (p_0 + p_1 + \Delta n) + \tau_{p0} (n_0 + n_2 + \Delta n)}{n_0 + p_0 + \Delta n} \quad (2.7)$$

bu yerdagi

$$\tau_{n0} = \frac{1}{N_t a_n}, \quad \tau_{p0} = \frac{1}{N_t a_p} \quad (2.8)$$

lar tok tashuvchilar juftining yashash vaqtlari hisoblanadi. Bu vaqtlar kuchsiz uyg'ongan unipolyar materiallardagi p - va n - turlarga mos ravishda to'g'ri kecladi.

Agar ushlar markazi taqiqlangan zonada 2 ta lokal (mahalliy) E_1 va E_2 sathlar hosil qilsa, muvozanat holatlardan biroz chetlashish va yopishib qolish hisobga olinmaganda

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1 + \frac{n_0}{p_0}}{1 + \frac{p_1}{p_0} + \frac{p_1 p_2}{p_0^2}} N_0 \left[\frac{1}{\frac{1}{a_{n1}} + \frac{1}{a_{p1}} \frac{n_1}{p_0}} + \frac{\frac{p_1}{p_0}}{\frac{1}{a_{n2}} + \frac{1}{a_{p2}} \frac{n_2}{p_0}} \right], \quad (2.9)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

Bu yerda ushlar koefitsiyentlaridagi ikkinchi indekslar tok tashuvchilarni qaysi sath orqali ushlanishini bildirsa, n_1, n_2, p_1, p_2 -lar (2.4) dagiga o'xshash holda E_1 ni E_1 yoki E_2 ga almashtirish bilan aniqlanadi.

Yarimo'tkazgichlarda tutib olish markazlaridan tashqari yana yopishib turish deb ataluvchi markazlar borki, ular o'tkazuvchanlik zonasidan elektronlarni ushlab oladi va yana qaytarib beradi, u holda n - turdagi namunada muvozanatdan biroz chetlanganda ham quyidagi ifodalar o'rinli bo'ladi.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = u_n &= \frac{\Delta n}{\tau_r} + \frac{\Delta n}{\tau_j} - \frac{\Delta n}{\tau_2}, \\ -\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = u_p &= \frac{\Delta n}{\tau_r}, \quad \Delta n_1 = \Delta p - \Delta n, \end{aligned} \quad (2.10)$$

Bu yerda τ_r - rekombinasion yashash vaqti

τ_j - yopishish sathidagi elektronning o'rtacha ushlanish vaqti

τ_2 - qaytadan tashlangan o'rtacha vaqti.

4.27. Hajm bo'yicha elektron - kovak juftlarining generasiya to'xtatilgandan so'ng $\tau_1 = 10^{-4} s$ o'tgach zaryad tashuvchilarning nomuvozanat konsentratsiyasi $n_1 = 10^{-3} s$ dagidan ko'ra $n = 10$ marta kattaroq ekanligi aniqlandi. Agar uyg'otish darajasi uncha katta bo'lmasa va rekombinasiya faqat oddiy nuqsonlar orqali yuz berayotgan bo'lsa yashash vaqti τ ni aniqlash.

4.28. 1 sm^2 yuzaga $1s$ ichida $I = 5 \cdot 10^{15}$ ta yorug'lik kvanti tushib turuvchi namunadagi o'tkazuvchanlik nisbiy o'zgarishini hisoblang. Yutilish koefitsiyenti $a = 100 \text{ sm}^{-1}$; namunani qalinligi a^{-1} ga nisbatan ancha kichik rekombinasiya oddiy nuqsonlarda o'tadi;

$$n_0 = 10^{13} \text{ sm}^{-3}, \tau = 2 \cdot 10^{-4} s$$

4.29. Agar generasiya manbai o'chirilgan paytda $t=0$ rekombinasiyu $\frac{dn}{dt} = (np - n^2)$, tezlik bo'yicha kechayotgan bo'lsa, bunda $a = \text{const}$ n - tur moddada erkin tok tashuvchilar konsentratsiyasining o'zgarish qonuniyatini aniqlang.

4.30. Yarimo'tkazgichda $N_A = 5 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ va $E_i = (E_s + E_v)/2$ rekombinasion markaz mavjud. $300^\circ K$ da elektron va kovaklarni tutilish kesimi bir xil, muvozanatdan kichik og'ish $\tau = 10^{-4} s$, $\rho = 50 \text{ m sm}$. Tutilish kesimi S ni toping.

4.31. n - Ge ning $n_0 = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ li namunasida rekombinasiya oddiy markazlarda yuz beradi. Ularning energetik sathi taqiqlangan sohaning yuqori yarmida joylashgan va $N_1 = 2 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$; $T = 300\text{K}$ da $\tau = 17 \text{ mks}$, $T = 200\text{K}$ da $\tau = 2 \text{ mks}$, juda past temperaturada $\tau \sim T^{-1/2}$. Kovaklarning tutilish kesimi S_p va n_0 ni doimiy deb hisoblab, E_i esa S_p ni aniqlang.

4.32. Turli n_0 esa p_0 li Ge namunalarida $N_1 = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ li oddiy rekombinasion markazlar mavjud. 300K da unipolyar n - Ge da $\tau = \tau_1 = 8 \text{ mks}$, $p_0 = p_{02} = 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $\tau_2 = 26 \text{ mks}$ maksimal τ esa $\tau = \tau_{maj} = 91 \text{ mks}$. Markazning energetik sathi taqiqlangan sohaning pastki yarmida joylashgan deb hisoblab, energetik sathi E_i ni zaryad tashuvchilarning tutilish kesim yuzasi va koeffitsiyentini aniqlang.

4.33. n -turli Ge da ($n_0 = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) stasionar gruppalash bilan hajm bo'yicha zaryad tashuvchilar jufti paydo qilinayпти. Kuchsiz yoritilganlikda $\tau_2 = 2 \text{ mks}$, $\Delta n/n_0 = 0,1$ da rekombinasiya $\tau = 4,7 \text{ mks}$ bilan yuz beradi. Agar rekombinasiya $E_i = E_c - 0,20 \text{ eV}$ li oddiy markazlarda yuz berayotgan bo'lsa, 300K da kovaklar va elektronlarning tutilish kesim yuzasi nisbatlarini hisoblang.

4.34. 300K da $\rho_n = 1,65 \Omega \cdot \text{sm}$ n - Ge li namunali uchun kuchsiz yoritilganligida yashash vaqti $\tau = \tau_1 = 2,0 \text{ mks}$, kuchliroq uyg'otishida $\rho_1 = 1,275 \Omega \cdot \text{sm}$ va $\tau = \tau_1 = 3,3 \text{ mks}$. Rekombinasiya $E_i = E_b + 0,32 \text{ eV}$ sath orqali yuz beradi deb hisoblab, monopolyar p -va n - Ge uchun shu rekombinasiya mexanizmida yashash vaqtini hisoblang.

4.35. Yarimo'tkazgichga $N_a = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyali akseptor aralashma kiritilgan. Ularni sathi taqiqlangan sohani o'rtasiga yaqin joylashgan. Tutilish kesimlari nisbati $S_n/S_p = 100$. Bunda yarimo'tkazgichga sayoz holatli donor $N_d = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ kiritilgan. Past temperaturada namuna yorug'lik bilan nurlantiriladi, bunda hajm bo'yicha bir tekisda $g = 10^{19} \text{ sm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ juft tezlikda zaryad tashuvchilar paydo bo'ladi. Elektronlarning yashash vaqti $\tau_n = 10 \text{ mks}$, τ_p nomuvozanatli Δn va Δp konsentratsiyalarni, shuningdek tutilish koeffitsiyentlari α_n esa α_p ni aniqlang.

4.36. p - Ge da nomuvozanatli zaryad tashuvchilarning yashash vaqti τ ni aniqlashda temperatura xona temperaturasidan to $T = 120^\circ\text{K}$ gacha o'zgargan. τ ni temperaturaga bog'liqligi quyidagi ko'rinishga ega bo'lgan:

$$\tau = 10^{-5} \left[3,1 - 6,2 \operatorname{th} \left(\frac{955}{T} - 4,41 \right) \right] \text{ sek}$$

Rekombinasiya 2 ta E_1 - taqiqlash sohasini pastki yarim va E_2 - yuqori yarim sohasida bo'lishi ma'lum. Elektronlarning tutilish koeffitsiyentini α_{n1} va α_{n2} hamda p_0 , n_i doimiy deb hisoblab, bu kattaliklar va E_i ni aniqlashda

$N_i = 2 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ va $N_p = 10^{19} \text{ sm}^{-3} = \text{const.}$ deb hisoblang. 200 K temperaturada elektronlarning tutish kesim yuzasini aniqlang.

4.37. Muvozanatdan kuchsiz og'ishni hosil qiluvchi stasionar generatsiya to'xtatilgandan so'ng, n -turli yarimo'tkazgichda qo'shimcha zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi qanday o'zgarishini aniqlash. Rekombinatsiya vaqti τ_r , tutilish vaqti τ_i va teskari o'tish vaqti τ_s ma'lum deb hisoblansin.

4.38. Yuqoridagi masala shartida ifodalangan sharoitda $n_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bunda stasionar generatsiya $g = 10^{19} \text{ sm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ n -Ge da o'tkazuvchanlikni nisbiy o'zgarishi aniqlansin va agar $\tau_r = 2 \text{ niks}$, $\tau_i = 5 \text{ mks}$, $\tau_s = 50 \text{ mks}$. bo'lsa uning relaksatsiyasini miqdoriy tadqiq qilish.

4.39. n -turdagi germaniyda kuchsiz qo'zg'atishda fotoo'tkazuvchanlik fotoelektromagnit effektlar bo'yicha aniqlangan. $\frac{\Delta p_1}{\Delta p} = 24$ va $n_0 = 4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$

Rekombinatsiya $E_i = E_g + 0.16 \text{ eV}$, $N_i = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $a_p = 10^{-8} \text{ sm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ markazida yuz beradi. $N_i = N_p = 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyali va yuqoridagidek tabiiatli markazlar mavjud bo'lganda hamda kuchsiz uyg'atish holati uchun elektron va kovaklarning yashash vaqti aniqlansin.

3. Zaryad tashuvchilarning diffuziyasi va dreyfi

Zaryad tashuvchilarning notekis taqsimoti natijasida namunada diffuzion toklar yuzaga keladi. Elektron va kovak diffuzion toklari quyidagi tenglamalar bilan aniqlanadi:

$$j_{\text{dif}} = eD_n \text{grad}n \quad j_{\text{dif}} = -eD_p \text{grad}p \quad (3.1)$$

Bunda e - elektron zaryadi, D_n va D_p - elektron va kovaklarning diffuziya koeffitsientlari, n va p ularning konsentratsiyasi.

Elektron va kovaklarning to'liq toki ushbu holda diffuzion va dreyf tashkil etuvchilar yig'indisidan iborat:

$$j_n = eD_n \text{grad}n + en\mu_n E,$$

$$j_p = -eD_p \text{grad}p + ep\mu_p E. \quad (3.2)$$

Bu yerda μ_n va μ_p -elektron va kovaklar harakatchanganligi.

Muvozanat holatida, unipolyar, masalan elektron yarimo'tkazgichda tok bo'lmasdi:

$$j_n = j_{n \text{ dif}} + j_{n \text{ dr}} = 0. \quad (3.3)$$

Elektronlarning konsentratsiyasini (1.5) formula yordamida o'tkazuvchanlik zonasining $-e\varphi$ (2) pasayishini hisobga olgan holda, bunda φ - elektrostatik potensialni deb hisoblab va (3.1) dan quyidagini topamiz:

$$j_{\text{dif}} = \frac{e^2 D_n}{kT} \frac{dn}{dn} \text{grad}n, \quad (3.4)$$

Bunda $\eta = \frac{F - E_s}{kT}$. Bundan (3.2) va (3.3) ga asoslanib topamiz:

$$D_n = \frac{\pi \mu_n kT}{e \frac{dn}{d\eta}}. \quad (3.5)$$

Xuddi shunday kovaklar uchun ham:

$$D_p = -\frac{p \mu_p kT}{e \frac{dp}{d\eta}}. \quad (3.6)$$

Aynimagan yarimo'tkazgichlar uchun (1.7) ifoda o'rinli bo'lganda (3.5) va (3.6) tengliklar Eynshteyn ifodasiga o'tadi:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{e}, \quad D_p = \frac{\mu_p kT}{e}. \quad (3.7)$$

Elektronlar va kovaklar kinetikasi uzliksizlik tenglamasi orqali tavsiflanadi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= g - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_n, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= g - \frac{\Delta p}{\tau_p} + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_p. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Bu yerda Δn va Δp elektron va kovaklar konsentratsiyasi n va p lar bilan ularning muvozanat paytidagi qiymatlari n_0 va p_0 orasidagi farq, g -birlik vaqt ichida namuna birlik hajmida paydo bo'lgan elektron - kovak juftlari soni:

$$g = \gamma a I e^{-\alpha x}, \quad (3.9)$$

Bunda γ -kvant chiqishi, α -yorug'likning yutilish koeffitsienti, $I e^{-\alpha x}$ kvant oqimi zichligi. τ_n va τ_p elektron va kovaklarning yashash vaqti (2,1) va (2,3) ifoda orqali hisoblanadi.

Diffuziya hodisasi ko'rib chiqilayotganda odatda uzunlik o'lchamidagi xarakterli kattalik kiritiladi:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \quad (3.10)$$

Bular mos ravishda elektron va kovaklarini diffuzion uzunligi deyiladi.

(3.8) va (3.2) tenglamalarga elektroneytrallik buzilgan hol uchun Puasson tenglamasini qo'shish lozim bo'ladi:

$$\operatorname{div} E = \frac{4\pi\rho}{\varepsilon}, \quad (3.11)$$

Bunda ρ -elektr zaryad zichlik, ε - yarimo'tkazgichning dielektrik singdiruvchanligi.

Ta'kidlash joizki, ko'pincha yarimo'tkazgichning lokal elektroneytrallik shartini kiritish mumkin.

Ushlanish bo'lmagan holda, ya'ni $\tau_n = \tau_p = \tau$, bu quyidagini anglatadi:

$$\rho = 0, \quad \operatorname{div}(j_n + j_p) = 0. \quad (3.12)$$

Bunda elektron va kovoklarning diffuziya va dreyfi o'zaro bog'liq - tez diffuziyalanuvchi tashuvchilarni tormozlovchi va sekinlanganlarini tortuvchi elektr maydon yuzaga keladi.

Oritqcha zaryad tashuvchilarning yagona neytral frontining tarqalishi, (3.8) va (3.12) ga asosan, quyidagi tenglama orqali ifodalanadi:

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau} + \text{div}(D \text{ grad} \Delta p) - \mu E \text{ grad} \Delta p, \quad (3.13)$$

Bunda D-bipolyar diffuziya koeffitsenti, μ -bipolyar dreyf harakatchanligi

$$D = \frac{\frac{n+p}{D_p} + \frac{p}{D_n}}{\frac{n}{D_p} + \frac{p}{D_n}}, \quad \mu = \frac{\frac{n-p}{\mu_p} + \frac{p}{\mu_n}}{\frac{n}{\mu_p} + \frac{p}{\mu_n}}. \quad (3.14)$$

Ushbu hodisa uchun harakterli uzunlik bu bipolyar diffuziya uzunligi L dir:

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (3.15)$$

Bipolyar diffuziya tenglamasi D-konstanta bo'lgan holda soddalashadi. Bu shunday holki, bir turdagi zaryadlar ko'p bo'lib bunda D - asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar diffuziya koeffitsenti, yoki xususiy o'tkazuvchanlik uchun:

$$n = p, \quad D = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}, \quad (3.16)$$

Bunda $\mu = 0$.

Nihoyat, (3.13) tenglama uchun chegaraviy shartiarni ifodalash darkor. Yarimo'tkazgich sirtida zaryad tashuvchilar rekombinasiyasi yuz berib turadi.

1sm² yuzada 1s ichida rekombinasiyalanuvchi juftlar sonini u , deb belgilaymiz va u , bilan quyidagi ifoda orqali bog'langan sirtiy rekombinasiya tezligini aniqlaymiz (sm/s o'lchamlikda):

$$s = \frac{u_s}{\Delta n} = \frac{u_s}{\Delta p}, \quad (3.17)$$

Bunda $\Delta n = \Delta p$ - sirtidagi ortiqcha zaryad tashuvchilar konsentratsyasi, sirtida rekombinasiyalanuvchi elektron va kovaklar u yerda sirtga qarab yo'nalgan ortiqcha zaryad tashuvchilar oqimi va sirtiy generasiya hisobiga paydo bo'ladi.

Shuning uchun p-tur yarimo'tkazgichda sirt uchun chegaraviy shart quyidagi ko'rinishga ega:

$$g_s = \frac{1}{e} (J_n \nu) + s \Delta n,$$

bunda ν sirtga o'tkazilgan tashqi birlik normal vektor. Bundan keyin yarimo'tkazgich kontaktidagi zaryad tashuvchilar tok zichligi uchun chegaraviy shartni asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar tokining umumiy tokka nisbati bilan aniqlanuvchi injeksiya koeffitsiyentini berish yo'li bilan ifodalaymiz.

4.40. Xona temperaturasida aynimagan germaniyda elektronlar diffuziya koeffitsiyentlarini hisoblang ($\mu_n = 3800 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$)

4.41. To'liq aynigan hol uchun elektronlar diffuziya koeffitsiyenti hisoblangin, elektronlar dispersiyasi (1.3 a) ko'rinishga ega,

$$\mu_n = 300 \text{ sm}^2 / V \cdot s, \quad n = 10^{18} \text{ sm}^{-3}, \quad m_s = 0.2 m_0.$$

4.42. Agar energiyaning kvazito'lqin vektoriga bog'liqligi (1.3b) ko'rinishda bo'lsa, aynigan elektron gaz uchun diffuziya koeffitsiyenti ifodasi olinsin.

4.43. Xona temperaturasida xususiy germaniy uchun diffuziya koeffitsiyenti hisoblansin ($b = 2.1$, $\mu_n = 3800 \text{ sm}^2 / V \cdot s$)

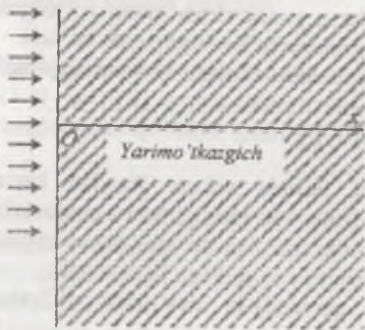
4.44. n -Ge qalin namunasi sirtida zaryad (2-rasm), tashuvchilarning nomuvozanatli konsentratsiyasini toping. Juftlar generatsiyasi hajm bo'yicha tekis: $g_0 = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^3 \cdot s^{-1}$, kovaklar yashash vaqti $\tau_p = 4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ sirt rekombinatsiya tezligi $S = 5 \cdot 10^2 \text{ sm/s}$, $D_p = 49 \text{ sm}^2 / s$.

4.45. n -Ge ning qalin namunasining yoritilgan sirtida kovaklarning nomuvozanat konsentratsiyasi topilsin. Bunda $s = 5 \cdot 10^2 \text{ sm/s}$, kvantlar oqimi zichligi $I = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2} \cdot s^{-1}$, kvant chiqishi $\gamma = 1$, yorug'likning yutilish koeffitsiyenti $a = 10^3 \text{ sm}^{-1}$, $\tau_p = 10^{-4} \text{ s}$, $D_p = 49 \text{ sm}^2 / s$.

4.46. Yarimo'tkazgich sirtiga normal yo'nalishda yuzaga keluvchi Dember effekti uchun elektr maydon kuchlanganligi ifodasini oling (2-rasmga qarang). Yoritilish shundayki, elektron - kovak juftlarining hosil bo'lishi yupqa sirtiy holatda bo'ladi, olingan ifodani $T = 300 \text{ K}$ temperaturada n -Ge uchun tahlil qiling, bunda $L = 0.3 \text{ mm}$, $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $\epsilon = 16$. Injeksiya sathini kichik deb hisoblang: $\Delta\sigma / \sigma_0 \ll 1$. Shuningdek $|\Delta n - \Delta p| \ll \Delta p$ deb oling.

4.47. n -turdagi germaniy qalin namunasining yoritilgan va qora sirtlari orasidagi Dember effekti natijasida yuzaga kelgan potensallar farqi topilsin. (2-rasmga qarang). Sirtiy juftlar generatsiyasi intensivligi $g_s = 10^{15} \text{ sm}^{-2} \cdot s^{-1}$, nomuvozanatli zaryad tashuvchilarning yashash vaqti $\tau = 19.3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, sirtiy rekombinatsiya tezligi $s = 100 \text{ sm/s}$, $D_n = 98 \text{ sm}^2 / s$, $b = 2.1$, $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$

4.48. n -turdagi yarimo'tkazgich yupqa plastinkasining ustki va pastki chegaralarida nomuvozanatni zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi topilsin.

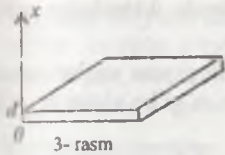


2- rasm

Bunda namuna yorug'lik ta'sirida hajmiy generatsiya ta'sirida, kvant oqimi zichligi $I = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2} \cdot s^{-1}$, yutilish koeffitsiyenti $a = 5 \text{ sm}^{-1}$, kvant chiqishi 1, plastinka qalinligi $d = 0.7 \text{ mm}$, sirtiy rekombinatsiya tezligi $s = 500 \text{ sm/s}$, $\tau_p = 10^{-4} \text{ s}$, $D_p = 49 \text{ sm}^2 / s$.

4.49. Kovaklarning stasionar injeksiyasi va namuna bo'yicha $E = 5 \text{ V/sm}$ elektr maydoni bo'lgan n -Ge sharoitida uzun ipsimon namunasida nomuvozanatni kovaklar taqsimotini aniqlang. Xona temperaturasi, yarimo'tkazgich aynimagan, $L_p = 0.09 \text{ sm}$.

4.50. Bir jinsli yarim cheksiz elektron yarimo'tkazgichning $x=0$ nuqtasida stasionar ravishda kovaklar injeksiyalanadi. Agar injeksiya koeffitsiyenti $\gamma=0,5$, to'liq tok zichligi $1,6 \text{ mA/sm}^2$, $L_p=0,1 \text{ sm}$, $D_p=50 \text{ sm}^2/\text{s}$ bo'lsa, $x=0$ nuqtada kiritilgan kovaklar konsentratsiyasi aniqlansin, kovaklar dreyfi hisobga olinmasin.



3- rasm

4.51. Oldingi masala shartidan foydalanib (biroq $L_p=0,05 \text{ sm}$), injeksiya nuqtasida elektr maydon kuchlanganligini hisoblang, bunda namunaning solishtirma o'tkazuvchanligi $\sigma_0=0,1 \Omega^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$, $b=2,1$ deb olish mumkin.

4.52. Bir jinsli yarim cheksiz elektron yarimo'tkazgichning $x=0$ nuqtasida stasionar ravishda injeksiyalanayotgan kovaklar taqsimotini tadqiq eting, bunda kovaklar yashash vaqti $\tau_p=a/p$, (a - doimiy kattalik), $\Delta p \gg p_0$, deb hisoblang, kovaklar dreyfini hisobga olmang. 4.53. $x=0$ nuqtasiga kuchli $E > 0$ elektr maydon qo'yilgan. Kuchsiz legirlangan elektron yarimo'tkazgich yarim cheklangan ($0 \leq x < \infty$) namuna chegarasida nomuvozanatli kovaklar konsentratsiyasi hisoblansin, injeksiya koeffitsiyenti $\gamma=0,15$, $n_0=10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $p_0=0,5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $b=2,1$, $\Delta n = \Delta p \ll n_0$ va jarayon stasionar deb hisoblang.

4.54. Oldingi masalada $E < 0$ deb olib, $x=0$ da nomuvozanatli kovaklar konsentratsiyasi hisoblang.

4.55. Bir jinsli elektron yarimo'tkazgich namunasining qaysidir nuqtasida yorug'lik zondi yordamida zaryad tashuvchilar jufti paydo qilinmoqda. Agar bundan $x_1 = 2 \pi \mu_n$ masofada nomuzonatli zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $\Delta p_1 = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $x_2 = 4,3 \text{ mm}$ masofada $\Delta p_2 = 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa, bir o'lchamli holat uchun kovaklar diffuziya uzunligi topilsin.

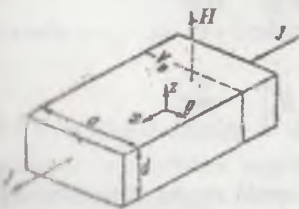
4. Magnit maydonda zaryad tashuvchilarning diffuziyasi va dreyfi.

Elektr maydoni E va unga perpendikulyar kuchsiz magnit maydoni H da joylashgan bir jinsli izotrop yarimo'tkazgichda tok zichligi quyidagicha bo'ladi:

$$J_n = ne\mu_n \left\{ E \left[1 - \eta_n \left(\frac{\mu_{nH}}{c} \right)^2 \right] - \frac{\mu_{nH}}{c} [\vec{E} \times \vec{H}] \right\}, \quad (4.1)$$

$$j_p = pe\mu_p \left\{ E \left[1 - \eta_p \left(\frac{\mu_{pH}}{c} \right)^2 \right] - \frac{\mu_{pH}}{c} [\vec{E} \times \vec{H}] \right\}. \quad (4.2)$$

Bu yerda μ_{nH} va μ_{pH} - Xoll harakatchanligi, η_n va η_p - zaryad tashuvchilar erkin yugirishi yo'lining energiyaga bog'liqligidan aniqlanuvchi doimiyliklar, magnit maydon shu ma'noda kuchsiz hisoblanadi, agar $\mu_{nH} H/c \ll 1$,



4- rasm

$\mu_{RH} H/c \ll 1$ bo'lsa. Bu holda keltirilgan formulalarda ikkinchidan yuqori tartibli hadlar tashlab yuboriladi.

4 - rasmda keltirilgan tajriba sharoitlarida namunaning yon yoqlari orasidagi shunday potentsiallar farqi V_H hosil bo'ladiki, bunda y o'qi bo'yicha E_x - Xoll maydoni ta'siri kuzatiladi.

Quyidagi ifoda Xoll doimiysi nomini olgan (j_x - tok zichligining ta'sir etuvchisi):

$$R = \frac{cE_y}{j_x H} \quad (4.3)$$

Xuddi shu sharoitlarda E_x va j_x orasidagi munosabat quyidagicha:

$$j_x = (\sigma_0 + \Delta\sigma) E_x, \quad (4.4)$$

σ_0 - $H=0$ dagi o'tkazuvchanlik, kuchsiz magnit maydonida o'tkazuvchanlikning nisbiy o'zgarishi odatda quyidagicha topiladi:

$$-\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \xi R_0^2 \sigma_0^2 \frac{H^2}{c^2}. \quad (4.5)$$

Bu yerda R_0 - Xoll doimiysining qiymati ($H \rightarrow 0$ da), ξ - magnit qarshilik koeffitsiyenti.

Bir jinsli bo'lmagan aynimagan yarimo'tkazgich holida (n va p koordinataga bog'liq) (4.1) ifodaga quyidagicha o'zgartirish kiritish lozim:

$$\vec{E} \rightarrow \vec{E}_n^* = \vec{E} + \frac{kT}{e} \text{grad} \ln n, \quad (4.1a)$$

(4.2) da esa

$$\vec{E} \rightarrow \vec{E}_p^* = \vec{E} - \frac{kT}{e} \text{grad} \ln p. \quad (4.2a)$$

Agar magnit maydon katta bo'lsa (lekin hali kvant effektlari sezilar bo'lmaganda $\frac{eHh}{mc kT} \gg 1$). Magnit maydon quyidagi tenglamalar orqali hisobga olinadi (bunda zaryad tashuvchilar erkin yugurish yo'li energiyaga bog'liq bo'lmagan hol qarab chiqiladi):

$$\vec{j}_n = \frac{ne\mu_n}{1 + \left(\frac{\mu_n H}{c}\right)^2} \left\{ \vec{E} - \frac{\mu_n}{c} [\vec{E} \times \vec{H}] \right\}, \quad (4.6)$$

$$\vec{j}_p = \frac{pe\mu_p}{1 + \left(\frac{\mu_p H}{c}\right)^2} \left\{ \vec{E} + \frac{\mu_p}{c} [\vec{E} \times \vec{H}] \right\}. \quad (4.7)$$

Magnit maydon tomonidan og'diriluvchi birlamchi zaryad tashuvchilar oqimi faqat tashqi E_x maydon tomonidan hosil qilinmaydi, balki 5 - rasmda ko'rsatilgandek, to'g'ri to'rtburchak shaklidagi namunaning izolyasiyalangan yog'i shunday yoritilganda elektron va kovaklar juftlari hajm bo'yicha notekis vujudga kelishiga binoan ham hosil bo'ladi.

n - yo'nalish bo'yicha diffuzion oqim hosil bo'ladi, magnit maydon ta'siri esa y yo'nalishi bo'yicha o'tadi, yoqlar orasida fotoelektromagnit effekt kuchlanishi V_{FE} yuzaga keladi. Namuna o'lchami katta bo'lgani uchun ZY tekislikda parametrlar x va y ga bog'liq bo'lmaydi.

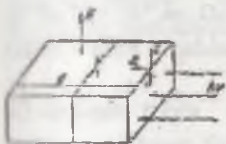
Stasionarlik shartidan $rot \vec{E} = 0$, $\frac{dE_x}{dx} = 0$,

ya'ni E_x hamma joyda bir hil.

Qurilayotgan sistemani quyidagi tenglamalar orqali ifodalash mumkin:

$$\frac{1}{e} div j_n = \frac{\Delta \psi}{\tau_n} = \frac{\Delta \rho}{\tau_p} = -\frac{1}{e} div j_p, \quad (4.8)$$

$$j_n + j_p = 0. \quad (4.9)$$



5- rasm

Bu yerda tutilish sathlarining to'lishi ortiqcha konsentratsiyaga proporsional. Kichik magnit maydonda tok zichligi uchun ifodada birinchi yaqinlashishida H li hadlarni hisobga olmaslik mumkin.

$$\vec{j}_n = \vec{j}_n^* - \frac{\mu_{nH}}{c} [\vec{j}_n^* \times \vec{H}], \quad \vec{j}_n^* = ne\mu_n \vec{E} + eD_n grad n, \quad (4.10)$$

$$\vec{j}_p = \vec{j}_p^* - \frac{\mu_{pH}}{c} [\vec{j}_p^* \times \vec{H}], \quad \vec{j}_p^* = pe\mu_p \vec{E} - eD_p grad p \quad (4.11)$$

$\Delta \psi$ va $\Delta \rho$ larni bir o'lchamli chegaraviy shartlar asosida topiladi:

$$g = -\frac{1}{e} j_n + S_0 \Delta n, \quad x = 0;$$

$$0 = \frac{1}{e} j_n + S_d \Delta n, \quad x = d.$$

Undi FEM - effekt tok zichligi (j_y) ni quyidagi tenglamadan topish mumkin

(yoki FEM effekt elektr maydoni E_y , misol uchun $\int_0^d dx j_y = 0$ da):

$$j_y = -eE_y (n\mu_n + p\mu_p) + \frac{eH(\mu_{nH} + \mu_{pH})}{c} D_n^* \frac{dn}{dx}. \quad (4.12)$$

bu yerda $n = n_0 + \Delta n$, D - bipolar diffuziya koeffitsiyenti (3.14) va

$$D_n^* = D \frac{n\tau_p + p\tau_n}{\tau_n(n+p)} \quad (4.13)$$

4.56. n - turdagi namunada x -o'qi bo'yicha $j_x = 0.1 A/sm^2$ tok bor (4-rasmga qarang) y - o'q bo'yicha magnit maydon $H = 1000$ ers. Panjara tebranishlaridagi so'zlash sharoitida $\mu_{nH} = 1.18 \cdot \mu_n$. Agar $n_0 = 10^{19} sm^{-3}$ va namunaning y yo'nalishi bo'yicha o'lchami $a = 0,5 sm$ bo'lsa, Xoll kuchlanishi V_H va R ni aniqlang.

4.57. p - turdagi namunaga tok yo'nalishiga tik ravishda $H_x = 4000$ ers magnit maydon qo'yilganda qarshilik 0,22% ga oshdi.

Agar $\mu_{pH} = 2240 \text{ sm}^2 / V \cdot s$, bo'lsa, ((4.1) va (4.2) ifodadagi) magnit qarshilik ξ_p va η_p koeffitsiyent hisoblansin.

4.58. Agar Xoll harakatchanlikning dreif harakatchanligiga nisbati 1,18 bo'lsa, $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyali akseptor aralashmasi bo'lgan InSb da $T = 300 \text{ K}$ temperaturada Xoll doimiysini aniqlang. $\mu_n / \mu_p = 80$, magnit maydon kuchsiz, $n_i = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, akseptorlarni butunlay ionizasiyalangan deb tushuring. 4.59. p -tur yarimo'tkazgichda $\beta = \mu_{pH} H / c = 0.2$ bo'lganda $R=0$, magnit qarshilik koeffitsiyenti ξ ni aniqlang. $b = \mu_n / \mu_p = 30$ va elektronning erkin yugurish yo'li energiyaga bog'liq emas.

4.60. Agar $\beta = 0,07$ sirdagi qo'shimcha zaryad tashuvchilar maksimal konsentratsiyasi $\Delta n(0) = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, n -turli namunada $\rho_0 = 1,6 \Omega \cdot \text{sm}$, $D_p = 45 \text{ sm}^2 / s$, $b = 2,1$ bo'lsa, massiv kubik namunaning yoqari orasidagi FEM - effekt kuchlanishini aniqlang.

4.61. Agar y o'qi bo'yicha qo'yilgan $E_{1y} = 0,168 \text{ V / sm}$ elektr maydoni (5-rasmga qarang) va $H = 1000 \text{ ers}$ (z) o'qi bo'yicha magnit maydoni x o'qiga perpendikulyar tushayotgan yoritilganlikka bog'liq bo'lmasa, p -tur yarimo'tkazgichda tok tashuvchilarni yashash vaqtini aniqlang. $D_n = 98 \text{ sm}^2 / s$ va

$\frac{\mu_{nH} + \mu_{pH}}{\mu_n + \mu_p} = 1,2$. Namunaning o'lchamlarini yetarlicha katta deb oling. Tutilishlar yo'q.

4.62. n -tur yarimo'tkazgichning $x=0$ sirtida (5-rasmga qarang) nomuvozanalar zaryad tashuvchilar yorug'lik ta'sirida shunday hosil bo'lyaptiki, bunda $\Delta n(0) = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, qarshilikning nisbiy kamayishi $\delta = 1,2\%$, $V_{\text{max}} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ V}$, $\beta = 0,1$. Agar $\mu_n = 3800 \text{ sm}^2 / V \cdot s$, $b = 2,1$, $D_p = 45 \text{ sm}^2 / s$, $d = 0,2 \text{ sm}$ hamda y o'qi bo'yicha namuna o'lchami $a = 1 \text{ sm}$ bo'lsa, τ_p va τ_n larni aniqlang.

5. Sirtiy hodisalar

Yarimo'tkazgichda sirtiy holatlarning mavjudligi elektr zaryadining ikkilamchi qatlarning paydo bo'lishiga olib keladi. Ular akseptor yoki donorligiga qarab manfiy yoki musbat zaryadlanadi, hamda sirtga yaqin sohada hajmiy zaryad sohasi vujudga keladi. Hosil bo'lgan elektr maydon energetik sathlarni akseptor holida yuqoriga va donor holida pastga egadi:

$$\begin{aligned} E_c(r) &= E_{c0} - e\varphi(r), \\ E_v(r) &= E_{v0} - e\varphi(r) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Hajmiy zaryad sohasida elektron va kovaklarning konsentratsiyasi koordinataga bog'liq bo'ladi. Aynimagan yarimo'tkazgich holida ushbu bog'lanish quyidagi ko'rinishga ega:

$$n(r) = N_c e^{\frac{F - E_D + e\varphi(r)}{kT}} = n e^{\frac{e\varphi(r)}{kT}}, \quad (5.2)$$

$$p(r) = N_a e^{\frac{E_a - e\varphi(r) - F}{kT}} = p e^{\frac{e\varphi(r)}{kT}}.$$

Elektrostatik potensial $\varphi(r)$ ni aniqlash uchun chegaraviy shartlar asosida, Puasson tenglamasini yechish dardor:

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho, \quad \vec{D} = \epsilon\vec{E} = -\epsilon\frac{d\varphi}{dr}, \quad (5.3)$$

bu yerda ρ - hajmiy zaryad zichligi ϵ - dielektrik singdiruvchanlik,

$$\rho = e[N_D^+(r) - N_A^-(r) + p(r) - n(r)] \quad (5.4)$$

va $p(r)$ (5.2) formula bilan aniqlanadi, hajmiy zaryad sohasidagi ionizatsiyalashgan donor va akseptorlarning konsentratsiyasi esa quyidagi formulalar bilan aniqlanadi:

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + e^{\frac{F - E_D + e\varphi(r)}{kT}}}, \quad (5.5)$$

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + e^{\frac{E_a - F - e\varphi(r)}{kT}}},$$

bu yerda $E_a = E_a^* + kT \ln g_a$, $E_D = E_D^* + kT \ln g_D$, yarimo'tkazgich hajmidagi akseptor va donor sohasi energiyasi, g_a va g_D - akseptor va donor sathlarning aynish darajasi hajmiy zaryad sohasi kengligi ekranlashtirish uzunligi yoki Dehay (L_D) uzunligi bilan xarakterlanadi. Elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgich uchun u quyidagiga teng:

$$L_D = \sqrt{\frac{ekT}{4\pi e^2 n}}, \quad (5.6)$$

Xususiy yarimo'tkazgich uchun esa quyidagiga teng:

$$L_D = \sqrt{\frac{ekT}{8\pi e^2 n_i}}. \quad (5.7)$$

Agar tashqi elektr maydon bo'lmasa yarimo'tkazgich elektroneytraldir. Yarim cheksiz yarimo'tkazgich namuna uchun elektroneytrallik sharti quyidagicha ifodalunadi (xuddi shu hol keyinchalik $x=0$ sirt bilan qarab chiqiladi) ($0 \leq x < \infty$):

$$\int_0^{\infty} \rho(x) dx + Q_s = 0, \quad (5.8)$$

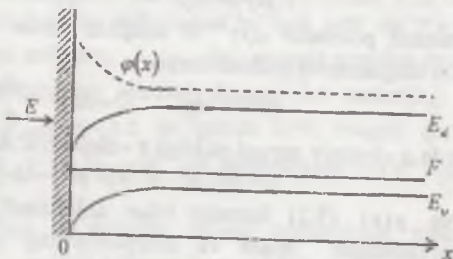
bu yerda Q_s - sirtiy holatlardagi sirtiy zaryad zichligi. Hajmiy zaryad qatlami Δ ni ortiqcha elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi quyidagi formula orqali hisoblanadi:

$$\Delta N = \int_0^{\Delta} [n(x) - p] dx, \quad \Delta P = \int_0^{\Delta} [p(x) - n] dx \quad (5.9)$$

bu yerda n va p elektron va kovaklarning hajmdagi konsentratsiyasi. Sirtiy o'tkazuvchanlik G quyidagicha aniqlanadi:

$$G = e\mu_n \Delta N + e\mu_p \Delta P, \quad (5.10)$$

Bunda μ_n^* , μ_p^* - elektron va kovaklarning hajmiy zaryad qatlamidagi effektiv harakatchanligi. Ko'pincha ular namuna hajmidagi harakatchanlikka teng deb olinadi.

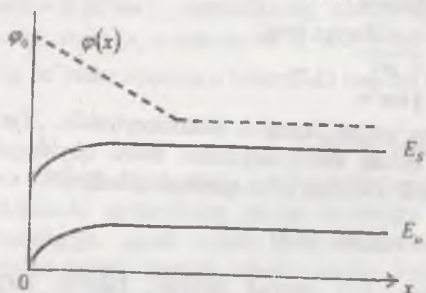


6-rasm

4.63. Agar xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgich sirtiga normal ravishda kuchsiz elektr maydon E qo'yilgan bo'lsa, bunda yarimo'tkazgichning hamma joyida $e\varphi/kT \ll 1$ bo'lsa (6-rasm), zonalarining shaklini aniqlang. Agar $E = 160 \text{ V/sm}$, $n_i = 2,0 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $\epsilon = 16$, $T = 300 \text{ K}$ bo'lsa, sirtidagi potensial sakrashini aniqlang.

4.64. Xona temperaturasidagi xususiy germaniyning sirtiga $N = 10^9 \text{ sm}^{-2}$ zichlik bilan donor aralashma adsorbsiyalangan bo'lsa, uning sirtida zonaning egilish kattaligini hisoblang. Donorlarning butunlay ionlashgan deb hisoblang $e\varphi/kT \ll 1$, $n_i = 2,0 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $\epsilon = 16$.

4.65. Xona temperaturasidagi xususiy germaniyning sirtiga $N = 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ zichlik bilan donor aralashma adsorbsiyalangan bo'lsa, uning sirtida zonaning egilish kattaligini hisoblang. Potensial $\varphi(x)$ ni ikkita to'g'ri chiziqli uchastkalardan



7-rasm

iborat deb oling (7-rasm).

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_0 - E_x, & 0 \leq x \leq \varphi_0/E, \\ 0, & x \geq \varphi_0/E, \end{cases}$$

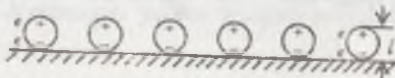
Bunda E -doimiy kattalik. Sirtidagi zonalar egriligini katta deb oling:

$$e\varphi_0/kT \gg 1 \quad n_c = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-2},$$

$$\epsilon = 16.$$

4.66. Agar yarimo'tkazgich sirtiga dipol momenti $d = el = 10^{-18} \text{ CGSE}$ birligi va

zichligi $N = 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan molekularlar kiritilgan bo'lsa, elektronlar chiqishishini o'zgarishini hisoblang (8-rasm).



8-rasm

4.67. Hajmida butunlay ionizasiyalangan aralashma bo'lgan yarimo'tkazgich uchun sirtidagi zaryad va sirtiy potensial orasidagi bog'lanishini toping.

$\varphi_s = \varphi_s > 0$ deb oling.

4.68. Agar n - tur kremniyning sirtiga $N = 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ konsentratsiyali donorlar adsorbsiyalangan bo'lsa uning sirtida zonalarning egilish kattaligini hisoblang. Hamma donorlar ionizasiyalangan, bunda $e\varphi_s / kT \gg 1$, $n = 10^{12} \text{ sm}^{-2}$, $\epsilon = 12$, $T = 300 \text{ K}$

4.69. Agar sirtidagi zonalar $e\varphi_s = 10kT$ ga egilgan bo'lsa, n - turli germaniyning sirtidagi zaryadni hisoblang. Hajmdagi donorlar butunlay ionizasiyalangan, $T = 300 \text{ K}$, $n = 10^{14} \text{ sm}^{-2}$, $\epsilon = 16$. Ushbu zaryadni hosil qilayotgan akseptor sathlarning konsentratsiyasini aniqlang. Akseptorlarni butunlay ionizasiyalangan deb hisoblang.

4.70. Agar akseptor molekullarning adsorbsiyasi natijasida energetik zonalar $0,25 \text{ eV}$ ga egilgan bo'lsa, hajmdagi barcha aralashmalar ionizasiyalangan kovakli yarimo'tkazgich uchun sirtiy o'tkazuvchanlikni taqriban hisoblang; $\mu = 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $\epsilon = 12$, $\mu_p^* = 10^3 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, temperatura xona temperaturasiga teng.

4.71. Agar sirtiy o'tkazuvchanlik $G = 10^{-7} \text{ sm}^{-1}$ bo'lsa, xususiy o'tkazuvchanli yarimo'tkazgichni sirtiy potensialini aniqlang. Yarimo'tkazgichning hamma joyida $e\varphi / kT \ll 1$ ($\varphi > 0$) deb oling; $\mu_n^* = \mu_n = 3800 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, $b = 2,1$, $\epsilon = 16$,

$n_i = 2,0 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $T = 300 \text{ K}$

4.72. Agar elektron yarimo'tkazgichning sirtiga normal ravishda $E = 5 \cdot 10^3 \text{ V} / \text{sm}$ elektr maydon qo'yilgan va bunda sirtiy o'tkazuvchanlik $10^{-6} \Omega^{-1}$ bo'lsa, sirtiy holatlardagi zaryadni aniqlang. Yarimo'tkazgichning hamma joyida $e\varphi / kT \ll 1$, $n = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $\epsilon = 16$, $\mu_n^* = \mu_n = 3800 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, $T = 300 \text{ K}$ deb oling.

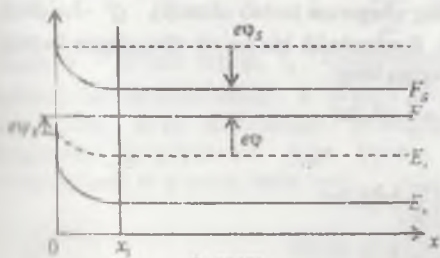
Yarimo'tkazgichdagi hamma donorlarni butunlay ionizasiyalangan deb oling.

4.73. Agar yarimo'tkazgich hajmidagi donor aralashma, ekranlash uzunligidan katta masofalarda to'la ionlashgan bo'lsa, N sirtiy konsentratsiyali donor molekullarning adsorbsiyasida n - turli yarimo'tkazgichdagi sirtiy potensialni aniqlang: $N_d = n = 3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$, $\epsilon = 16$, $T = 300^\circ \text{ K}$ ikki xil holni qarab chiqing:

a) $N = 10^9 \text{ sm}^{-2}$, bunda $e\varphi / kT \ll 1$ deb hisoblang, bunda $\varphi_s = \varphi_s|_{x=0}$,

b) $N = 3 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$, bunda $e\varphi / kT \gg 1$.

4.74. Agar sirtiy potensial $|\varphi_s| = 0,25 \text{ V}$ bo'lsa, yarimo'tkazgichda manfiy zaryadlarning sirtiy zichligini aniqlang. Yarimo'tkazgich ichidagi akseptorlarni (erkin uzunligidan katta masofalarda) butunlay ionizasiyalangan deb oling.



9- rasm

$$p = 3 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-3}, \quad \varepsilon = 16, \quad T = 300 \text{ K}.$$

4.75. Uzunligi va kengligi qalinligidan $2a = 0,5 \text{ mm}$ dan ancha katta bo'lgan yupqa va uzun plastinka uchun sirtiy rekombinasiya tezligi s ni aniqlang. Rekombinasiya tezligi plastinkani ikkala tamoni uchun bir xil. Nomuvozanatli zaryad tashuvchilarning effektiv yashash vaqti $\tau_i = 125 \text{ mks}$, qalin namuna uchun o'lgangan hajmiy yashash vaqti $\tau_p = 250 \text{ mks}$, $sa/D_p \ll 1$ shartdan foydalaning.

4.76. Yupqa plastinkaning yuqori yog'idagi sirtiy rekombinasiya tezligi s_1 ni aniqlang. Uning uzunligi va kengligi qalinligi $2a = 0,2 \text{ mm}$ dan ancha katta, $s_1 \gg s_2$, bunda s_2 - paski yog'ning sirtiy rekombinasiya tezligi. Plastinkadagi nomuvozanatli zaryad tashuvchilarning effektiv yashash vaqti $\tau_i = 20 \text{ mks}$, hajmiy yashash vaqti $\tau_p = 100 \text{ mks}$. $s_1 a / D_p \ll 1$ shartdan foydalaning.

4.77. Sirtiy rekombinasiya tezligi s ning sirtiy potensial u_s ga bog'liqligini toping (9-rasm). (3.17) ga asosan, $s = \frac{u_s}{\Delta n}$, bunda $u_s = u_{p0} = u_{n-1}$, sm^2 sirdagi elektron va kovaklar tutilishini absolut maromi. Rekombinasiyada qatnashuvchi sirtiy markazlar zichligi N_1 , energiyasi E_1 , $\Delta p = \Delta n$ hajmiy zaryad sohasiga yaqin joydagi ($x = x_1$) ortiqcha zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi. Injeksiya darajatsini yuqori emas ($n_0 \gg \Delta p$) hamda yarimo'tkazgichni aynimagan va statsionar sharoitda deb hisoblang.

4.78. Agar sirtiy rekombinasiya tezligi $s(\varphi)$ $e\psi_s = 1,1kT$ da maksimumga erishsa, oldingi masala shartidagi hol uchun elektron va kovaklarning tutilish kesimlarining nisbatini aniqlang.

6. Yarimo'tkazgichdagi termo elektr yurituvchi kuch (EYuK)

Bir turdagi zaryad tashuvchili yarimo'tkazgichning differensial termo elektr yurituvchi kuchi quyidagi ifoda bilan beriladi:

$$\alpha = \pm \frac{k}{e} \left(\frac{Q^*}{kT} \pm \eta \right), \quad (6.1)$$

bunda ishora zaryad tashuvchilar ishorasi bilan mos keladi, $\eta = \frac{F}{kT}$, F -Fermi sathi (sanoq boshi qilib mos zonaning chegarasi tanlab olinadi), Q^* - ko'chish energiyasi deb nomlanuvchi kattalik. Keyinchalik biz ko'rib chiqadigan izotrop hol uchun ko'chish energiyasi quyidagiga teng:

$$Q^* = \frac{q}{\sigma} \quad (6.2a)$$

oxirgi ifodada

$$\sigma = \left\langle \frac{e\tau}{m} \right\rangle, \quad (6.3a)$$

$$q = \left\langle \frac{e\tau}{m} \cdot E \right\rangle \quad (6.3b)$$

belgi $\frac{k^3(E)}{3\pi^2} \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right)$ kattalik bilan energiya bo'yicha integrallashni bildiradi:

$$\langle A(E) \rangle = \frac{1}{3\pi^2} \int_0^{\infty} dEk^3(E) \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) A(E)$$

U erda f -Fermi funksiyasi (1.2), τ -relaksatsiya vaqti bo'lib kvaziimpuls (energiya) ga quyidagi qonun bo'yicha bog'liq:

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{dE}{d\hbar k} \cdot k^{2\gamma-1}, \quad (6.4)$$

m^* esa massa o'lchamligiga ega bo'lgan va quyidagi ifoda bilan aniqlanuvchi kattalik:

$$m^* g = \hbar k \quad \left(g = \frac{1}{\hbar} \nabla_k E(k) \right) \quad (6.5)$$

Umuman olganda, m^* kattalik energiyaga bog'liq, dispersiya kvadrat qonunining oddiy holda u doimiy bo'lib, zaryad tashuvchilarning oddiy holda aniqlanadigan effektiv massasi bilan mos tushadi (14-masalaga qarang).

(6.4) formulada τ kattalik zaryad tashuvchilar impulsining sochilish mexanizmi bilan aniqlanadi. Zaryad tashuvchilarning panjaraning akustik tebranishlarida sochilish holida $r=0$, panjaraning optik tebranishlar holida $r=1$, Debay temperaturasidan katta temperaturalarida, $T < T_D$ da $r=1/2$, zaryadlangan aralashmalarda sochilish holida $r=2$.

Agar sistemada bir necha turli zaryad tashuvchilar mavjud bo'lsa, to'liq termo EYuK quyidagiga teng:

$$\alpha = \sum_i \frac{\sigma_i}{\sigma} \alpha_i, \quad (6.6)$$

bunda σ_i va α_i - o'tkazuvchanlik va termo EYuK bo'lib, ular i - turdagi zaryad tashuvchilar bilan bog'liq. σ -to'liq o'tkazuvchanlik va uni umumlashtirish barcha turdagi zaryad tashuvchilar bo'yicha olinadi.

Kichik temperaturalarda toza materiallarda zaryad tashuvchilarni fotonlar tomonidan ergashtirib ketish effekti hisobiga termo EYuK (6.1) ifoda beradigan qiymatdan kattaroq qiymat olishi mumkin. Ushbu holda termo EYuK ning fonon tashkil etuvchisi quyidagiga teng:

$$\alpha_F = a \frac{g_S l_F}{\mu T}, \quad (6.7)$$

bunda g_S - tovush tezligi, l_F - fononlarning erkin yugurish yo'li, μ -zaryad tashuvchilar harakatchanligi, a -akustik tebranishlardagi sochilishning zaryad tashuvchilar to'la sochilishiga qo'shadigan nisbiy hissasi extimolligini belgilovchi ko'paytuvchi. Agar hamma sochilishlar panjaraning akustik tebranishlarda ro'y bersa, unda $a \approx 1$.

Magnit maydonda¹ termo EYuK oldingidek (6.1) ifoda bilan belgilanadi, bunda

$$Q = \frac{\sigma_1 q_1 + \sigma_2 q_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (6.2b)$$

bunda

$$\sigma_1 = \left\langle \frac{e\tau}{m^*} \frac{1}{1+\omega^2} \right\rangle, \quad \sigma_2 = \left\langle \frac{e\tau}{m^*} \frac{\omega}{1+\omega^2} \right\rangle, \quad (6.3v)$$

$$q_1 = \left\langle \frac{e\tau}{m^*} E \frac{1}{1+\omega^2} \right\rangle, \quad q_2 = \left\langle \frac{e\tau}{m^*} E \frac{\omega}{1+\omega^2} \right\rangle, \quad (6.3g)$$

$$\omega = \frac{eH}{m^* s} \tau.$$

4.79. Kvadratik dispersiya qonunida zaryad tashuvchilar uchun magnit maydon bo'lmaganda termo EYuK uchun ifoda olinsin. Xona temperaturasida tipik metall uchun tipik termo EYuK ni baholang ($m_{mi} = m_0$, $n_{mi} = 2 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$) va aynan turli yarimo'tkazgich uchun ($m_{yo} = 0,22m_0$, $n_{yo} = 2 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$) hisoblangan termo EYuK bilan taqqoslang. Ikkala holda ham sochilish zaryadlangan kirishmalarda bo'ladi deb hisoblang.

4.80. Grafikda n -turli germaniy termo EYuK ni temperaturaga bog'lanishini kirishmali va xususiy sohalarda tasvirlang.

4.81. Sochilish akustik tebranishlarda sodir bo'ladi deb hisoblab, $T=200 \text{ K}$ da $6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ miqdorda mayda akseptorlari bo'lgan p -turli germaniyda termo EYuK ni kattaligini hisoblang.

4.82. Agar 100 K da termo EYuK $2,1 \text{ mV/grad}$ ga teng bo'lsa, kompensirlangan n -turli yarimo'tkazgichda donorlar energetik sathi holatini aniqlang. $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $n_d \ll N_a$, kompensasiya darajasi $N_d/N_a = 0,5$ ekani ma'lum, sochilish esa panjara akustik tebranishlarida yuz beradi.

4.83. n -turli yarimo'tkazgich termo EYuK ifodasini chegaraviy kuchli aynigan hol uchun keltirib chiqaring, dispersiya qonuni (1.3 j) ko'rinishga ega. Agar sochilish zaryadlangan kirishmalarda bo'layotgan bo'lsa, 100 K da elektronlar konsentratsiyasi 10^{18} sm^{-3} bo'lgan indiy antimonidida termo EYuK ni toping. O'tkazuvchanlik sohasining quyi qismida elektronlarning effektiv massasi $0,013 m_0$, taqiqlangan soha kengligi temperaturaga quyidagicha bog'langan: $E_g = (0,26 - 2,7 \cdot 10^{-4}) eV$

4.84. Ixtiyoriy aynishda dispersiya qonuni (1.3 j) ko'rinishda bo'lgan n -turli yarimo'tkazgich termo EYuK ifodasini keltirib chiqaring. Bunda sohalarni noparabolikligi katta emas deb hisoblang va sohalarning noparabolikligidan kelib chiquvchi tuzatmalarning birinchi tartibi bilan chegaralansin.

¹ Biz unchalik kuchli bo'lmagan magnit maydonni qaraymiz, bunda elektronlar energiyasining magnit maydon aydonda

kvantlanishi sezilarsiz. (6.2 b), (6.3 v), (6.4 g) qo'llanish sharti $\frac{eH}{m^* s} \ll kT$

4.85. 20K temperaturada n-turli germaniy termo EYuK fonon tashkil etuvchisini baholang. Tadqiq etilayotgan namunada elektronlarning harakatchanligi asosan akustik tebranishlardagi sochilish bilan aniqlanadi va $4 \cdot 10^5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ga teng. fononlarning sochilishi namuna devorlarida yuz beradi. Namunaning ko'ndalang o'lchamlari 1 mm, tovush tezligi esa $4 \cdot 10^5 \text{ sm/s}$.

4.86. 20K da indiy antimonidida elektronlarning kuzatiluvchi harakatchanligi $2 \cdot 10^7 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, sochilish faqat akustik tebranishlarida yuz berganda aniqlangan, harakatchanlik xona temperaturasida $10^8 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ga teng. Fononlarning sochilishi namuna devorlarida yuz beradi deb hisoblab, n-tur indiy antimonidida termo EYuK ning fonon tashkil etuvchisini n-turli germaniy termo EYuK i fonon tashkil etuvchisiga nisbatini baholang. *InSb* da tovush tezligi 10^5 sm/s , namunalarning ko'ndalang o'lchamlari bir xil deb hisoblang. Germaniy uchun ma'lumotlarni oldingi masala shartidan oling.

4.87. Kuchli magnit maydonda p -- tur yarimo'tkazgich termo EYuK ni xona temperaturasida o'lchash natijalari ($\omega \gg 1$) shuni ko'rsatdiki, o'rganilayotgan sohada termo EYuK magnit maydonga bog'liq emas va u 475 mkV/grad ga teng. Ulabu o'lchashlar natijasiga ko'ra, kovaklar effektiv massasini toping. Ularning konsentratsyasi $5,6 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ga teng. Kovaklar dispersiya qonuni kvadratik deb hisoblansin.

4.88. Aynish bo'lmagan holda kuchli magnit maydon ($\omega \gg 1$) da (1.3a) qonuni bo'yicha o'zgaruvchi dispersiyada n-tur yarimo'tkazgich uchun termo EYuK ifodasi topilsin.

$\Delta\epsilon(\omega) = a_{H \rightarrow \infty}^n - a_{H=0}^n$ farqning sochilish mexanizmiga bog'liqligi qarab chiqilsin.

4.89. 77K temperaturada elektronlar konsentratsyasi 10^{17} sm^{-3} bo'lgan indiy antimonidi namunasida, termo EYuK kuchli magnit maydon sohasida magnit maydonga bog'liq emas va u 68 mkV/grad ga teng. Dispersiya qonuni (1.3 j) ko'rinishda deb olib, o'tkazuvchan soha tubidagi elektronlar effektiv massasi kattaligini toping. 77K da taqiqlangan soha kengligi $0,22 \text{ eV}$ ga teng.

4.90. n-turli aynigan yarimo'tkazgich termo EYuK, kuchli magnit maydon sohasida doimiy va u - 27 mkV/grad ga teng. O'lchashlar shu temperaturada termo EYuK qiymati - 51 mkV/grad ga tengligini ko'rsatdi. Tadqiq qilinayotgan materialda o'tkazuvchan soha parabolik ko'rinishda bo'lsa, elektronlarning sochilish xarakterini aniqlovchi r ni toping.

4.91. Indiy arsenidi uchun elektronlarning o'tkazuvchanlik sohasidagi qonuni uchun $0,6 \text{ eV}$ energiyagacha bajariluvchi quyidagi empirik ifoda olindi:

$$E(k) = 0,28 \ln[1 + 5,9 \cdot 10^{-14} k^2 (\text{zm}^{-2})] \text{ eV}.$$

Qanday elektronlar konsentratsyasida kuchli magnit maydonda termo EYuK o'zgarishi nolga teng bo'ladi? Agar dispersiya qonuni (1.3 j) ko'rinishga ega bo'lsa, u nolga aylanishi mumkinmi? Sochilish zaryadlangan kirishmalarida deb hisoblang.

7. Yarimo'tkazgichlarda foto EYuK

Yarimo'tkazgich namuna yoritilganda, Dember effekti bilan bir qatordagi (46-masalaga qarang), ya'ni ortiqcha zaryad tashuvchilarning notekis taqsimot bilan birga, foto EYuK yarimo'tkazgich materialning bir jinsli bo'lmaganligidagi ham vujudga keladi. Sodda uchun, nomuvozanatli $n = n_0 + \Delta n$ va $p = p_0 + \Delta p$ konsentratsiyalar faqat x koordinataga bog'liq bo'lgan bir o'lchamli masalani ko'rib chiqamiz. Ushbu holda foto EYuK quyidagi ifoda orqali ifodalanadi.

$$\varepsilon = \int dx \frac{D_n \frac{dp}{dx} - D_p \frac{dn}{dx}}{\mu_n n + \mu_p p}, \quad (7.1)$$

bu yerda integral namunani o'z ichiga olgan butun zanjir bo'yicha olinadi. Agar Eynshteyn ifodasi (3.7) o'rinli bo'lsa, u holda

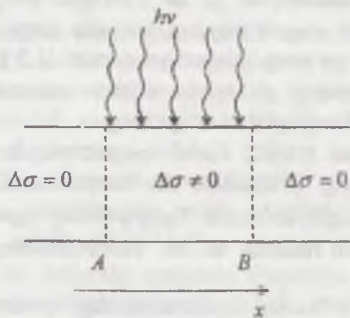
$$\varepsilon = \frac{kT}{e} \int dx \frac{\frac{dp}{dx} - b \frac{dn}{dx}}{bn + p}, \quad b = \frac{\mu_n}{\mu_p}. \quad (7.2)$$

Namunani bir jinsli emasligi bilan bog'langan ε_1 hadni (ventil foto EYuK) ε_2 dan ajratib olish mumkin ((7.2) formuladan kelib chiqamiz): $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

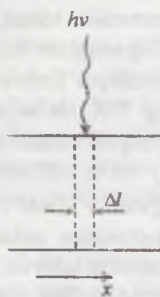
$$\varepsilon_1 = \frac{kT}{e} \int dx \frac{1+b}{bn+p} \Delta n \frac{d \ln n_0}{dx}, \quad (7.3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{kT}{e} \int dx \frac{1-b}{bn+p} \frac{d \Delta n}{dx}. \quad (7.4)$$

4.92. Ixtiyoriy aynish darajasida unipolar (birqutbli) o'tkazuvchanlikli yarimo'tkazgichda foto EYuK ini toping.



10- rasm



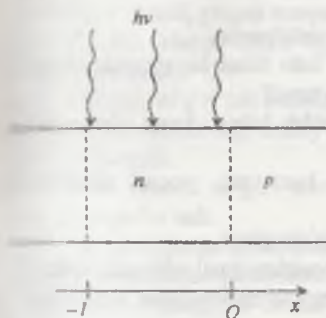
11- rasm

4.93. $T = 300\text{K}$ da $n\text{-Ge}$ namunasi uchun foto EYuK ni hisoblang. Bunda uning o'rtasi qismi (10-rasm) shunday yoritilganki, uning ichida $\Delta\sigma = 0,2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,

tashqarisida esa $\Delta\sigma=0$, yoritilganlik bo'lmaganda A kesimida solishtirma qarshilik $\rho_{0,A}=15 \Omega \cdot \text{sm}$ va B da $\rho_{0,B}=5 \Omega \cdot \text{sm}$ kesimida

4.94. Oldingi masala shartiga o'xshash sharoitda $\rho_{0,A}=10 \Omega \cdot \text{sm}$ $\rho_{0,B}=8 \Omega \cdot \text{sm}$ va $\Delta\sigma$ ning ikki xil qiymatida: $\Delta\sigma=0,01 \Omega^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$, $\Delta\sigma=2 \Omega^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$ bo'lganda foto EYuK ni hisoblang.

4.95. *n-Ge* namuna $\Delta l=0,1 \text{ mm}$ kenglikli ingichka bo'lakchasi yoritiladi va



12- rasm

2.5 · 10¹⁵ sm⁻³ s⁻¹ zaryad tashuvchilar jufti paydo bo'lib turadi. $x=0$ nuqtada $\rho(0)=1 \Omega \cdot \text{sm}$ yorug'lik zondini namuna bo'yicha harakatida foto EYuK quyidagicha o'zgaradi:

$$\varepsilon(x) = \frac{A}{1+Bx}, \text{ bu erda } A=3 \cdot 10^{-4} B, B=3 \cdot 10^{-4} \text{ sm}^{-1}.$$

Xona temperaturasi $x=2 \text{ sm}$ nuqtada ρ aniqlansin.

4.96. 75K da *Ge* da *p-n* o'tishda yuzaga keluvchi ventil foto EYuK ni bir jinsli uyg'otilgan hol uchun hisoblang. *p-n* o'tishga tutashuvchi *n*-soha yoritilyapti (12-rasm); unda $\Delta n=10^{18} \text{ sm}^{-3}$, tashqarida $\Delta n=0$, *n*-soha ichida $n_0=n_n=10^{15} \text{ sm}^{-3}$, *p*-sohada

$$p_p=10^{14} \text{ sm}^{-3}; \mu_n=3 \cdot 10^4 \text{ sm}^2/V \cdot \text{s}; b=0,5.$$

4.97. $d=1 \text{ sm}$ qalinligidagi *n*-turli namuna o'qlari orasidagi potensiallar farqi $\Delta\varphi$ ni aniqlang. Bunda $x=0$ yoq yoritilganligida nomuvozanatli konsentratsiya.

$$\Delta n(x) = \Delta p(x) = N \exp(-x/L)$$

$$0 \leq x \leq d$$

bu yerda $N=10^{13} \text{ sm}^{-3}$, $L=0,01 \text{ sm}$. Elektronlarning muvozanatli konsentratsiyasi $x=0$ da $n_0'=5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ dan $n_0''=4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha $x=d$ da chiziqli ravishda o'zgaradi. Temperatura $T=200\text{K}$, $b=2,1$.

4.98. 4.93-masala shartidagidek sharoitda foto EYuK ni hisoblang, faqat bunda tutilishlar bor, $\tau_p/\tau_n=10$ deb oling.

Masalalarning javoblari va yechimlari

1 - qiyalik darajadagi masalalarning javoblari

- 1.1. O`tkazgichlar qarshiligi ortadi, izolyatorlar qarshiligi esa kamayadi.
- 1.2. Temperatura ortganda kamayadi. Yo`q.
- 1.3. Termistor qiziganda uning qarshiligi keskin kamayadi va u ulangan zanjirda tok hosil bo`ladi.
- 1.4. Teng miqdordagi elektron va kovaklar.
- 1.5. Yarimo`tkazgichlar qizdirilganda yoki ular yoritilganda.
- 1.6. Chunki elektron - kovak juftligi hosil bo`lishi bilan bir qatorda, avval hosil bo`lganlarining rekombinatsiyasi sodir bo`lib turadi.
- 1.7. Yarimo`tkazgichga akseptor elementini kiritish bilan; donor elementini kiritish bilan.
- 1.8. Uncha katta bo`lmagan temperaturalarda kamayadi, yuqori temperaturalarda ortadi.
- 1.9. Ularga $p - n$ o`tish sohasida elektr maydon ta`sir qiladi.
- 1.10. To`g`ri tok asosiy zaryad tashuvchilar tomonidan hosil qilinadi, teskari tok esa nisbatan kam bo`lgan, asosiy bo`lmagan zaryad tashuvchilar tomonidan hosil bo`ladi.
- 1.11. Agar qarshilik bo`lmasa, ventildan o`tuvchi tok juda katta bo`ladi va $p-n$ o`tish kontaktlarida to`g`ri kuchlanish keskin ortadi, natijada ventil ishdan chiqadi.
- 1.12. Yarimo`tkazgichlar kuchli qizdirilganda elektron - kovak juftligi hosil bo`lishi keskin ortadi.
- 1.13. Negaki asosiy va asosiy bo`lmagan zaryad tashuvchilar baza orqali o`tganda rekombinatsiyalanib ulgurmasligi kerak.
- 1.14. Emitter o`tish orqali tokning asosiy qismi bazadan o`tuvchi va kollektorga boruvchi zaryad tashuvchilardir. Baza zaryad tashuvchilaridan tashkil topgan emitter tokining boshqa qismi kollektor o`tish bilan bog`liq emas va u samarasizdir.
- 1.15. Kollektor zanjiridagi manba energiyasi hisobiga.
- 1.16. O`tkazgichlarning qarshiligi ortib, dielektriklarning qarshiligi kamayadi.
- 1.17. Termistor qiziganda uning qarshiligi keskin kamayadi va zanjirning u ulangan qismidagi tok kuchi ortadi.
- 1.18. O`tkazgichda kuchlanish ortadi. Yarimo`tkazgichda kamayadi.
- 1.19. O`tkazgichda tok kuchi kamayadi. Yarimo`tkazgichda ortadi.
- 1.20. Elektronlar va kovaklar soni bir xil bo`ladi.
- 1.21. Elektronni atomdan uzib chiqarish uchun energiya sarflash kerak. Bunga qizdirish, nurlanish kabi ta`sirlar sabab bo`ladi.
- 1.22. Tellur, chunki isitish natijasida uning qarshiligi kamayadi.
- 1.23. Yo`q, chunki temperatura pasayishi bilan kremniyning qarshiligi ortadi.
- 1.24. Rekombinatsiya.

- 1.25. Chunki elektron - kovak juftlari hosil bo'lishi bilan bir qatorda avval hosil bo'lgan elektronlar va kovaklarning rekombinatsiyasi ham mavjud bo'ladi.
- 1.26. 1. Yarimo'tkazgichga Mendeleev jadvalidagi akseptorli va donorli guruq elementlaridan aralashma kiritish yo'li bilan. 2.V guruq elementlari: P, As, Sb qo'shilganda ko'proq elektron o'tkazuvchanlik; Ga, B, In kabi III guruq elementlari qo'shilganda ko'proq kovakli o'tkazuvchanlik ortadi.
- 1.27. Uncha katta bo'lmagan temperatura oralig'ida qizdirilganda ularning qarshiliklari ortadi, yuqori temperaturada esa kamayadi.
- 1.28. Chunki, ularga elektr maydon kuchi ta'sir etib, ularni $p-n$ sohadan chiqarib yuboradi.
- 1.29. Chunki, to'g'ri tok kuchini asosiy zaryad tashuvchilar, teskari tok kuchini esa juda kam miqdordagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar hosil qiladi.
- 1.30. Kamayadi.
- 1.31. Ular orasida to'g'ri mutanosiblik yo'qligi sababli chiziqli bo'lmagan bog'lanishda bo'ladi.
- 1.32. Termistorlarda qarshilikning temperaturaga bog'lanishidan foydalanilsa, fotorezistorlarda esa qarshilikning yoritilganlikka bog'likligidan foydalaniladi.
- 1.33. Yarimo'tkazgichli kristal elektron va kovakli o'tkazuvchanliklarga ega.
- 1.34. $I_c = I_b + I_r$
- 1.35. Energiyani ko'proq iqtisod qiladi; qurilmalar hajmi juda ixcham va yengil bo'ladi.
- 1.36. Nagruzka bo'lmaganda ventildan o'tayotgan tok keskin ortadi va ventil ishdan chiqadi.
- 1.37. Yarimo'tkazgich juda qiziganda elektron - kovak juftlarining hosil bo'lishi ortadi. 70°C gacha, $120-150^{\circ}\text{C}$ gacha.
- 1.38. Baza orqali o'tuvchi asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar rekombinasiyalanib ulgurmasligi uchun.
- 1.39. Chunki, baza orqali kollektorga o'tuvchi emitter tok kuchining asosiy qismini asosiy zaryad tashuvchilar tashkil etadi. Bazaning asosiy zaryad tashuvchilaridan iborat bo'lgan emitter orqali o'tuvchi tok kuchining boshqa qismi kollektor o'tish bilan bog'liq emas va u foydasiz tok kuchidir.
- 1.40. Baza, kollektor, emitter.
- 1.41. Yo'q. Chunki birinchi holda tok kuchi ko'proq bo'ladi va ko'proq ortadi.
- 1.42. Kollektor tarmog'idagi tok manbai energiyasi hisobiga.
- 1.43. Kovakli o'tkazuvchanlik; elektronli o'tkazuvchanlik.
- 1.44. Fosfor, mishyak, va surma - V - guruq elementi.
- 1.45. Chunki tranzistor radiopriyomnik asbobning bir elementidir, shuning uchun uning to'g'ri nomi tranzistorli radiopriyomnik deyiladi.

2 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari

- 2.1. 2,5 mA
- 2.2. Tok va kuchlanish qiymatlari asosida voltamper xarakteristika chiziladi
- 2.3. —

- 2.4. 4Ω ; $1,1 M \Omega$
- 2.5. $70 \text{ W} \cdot \text{soat}$
- 2.6. Erkin zarrachalar konsentratsiyasi ortadi.
- 2.7. Yo`q. Past temperaturada kremniy qarshiligiga ortadi.
- 2.8. 25% ga
- 2.9. $\approx 2,3 \cdot 10^{-7}\%$
- 2.10. $\approx 1,0 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$
- 2.11. n-turli; $\approx 1,1 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$
- 2.12. $\approx 9,6 \cdot 10^{-5}\%$
- 2.13. 1) Elektronli, chunki mishyak valentligi germaniy valentligidan katta;
2) Kovakli, chunki indiy valentligi germaniy valentligidan kichik.
- 2.14. Fosfor kiritilganda n-turli, boshqa hollarda p-turli o`tkazuvchanlikka ega bo`ladi.
- 2.15. Yo`q, chunki qalay uch valentli.
- 2.16. Kovaklarga nisbatan elektronlar harakatchanligi yuqori.
- 2.17. 1.O`ng qismi o`tkazuvchan, chap qismi taqiq yo`nalish; 2.Tok kuchi va kuchlanish qiymatlarining farqi katta bo`lgani uchun.
- 2.18. $0-10 \text{ mA}$; 100°C ; $\approx 70^\circ \text{C}$; $\approx 30^\circ \text{C}$.
- 2.19. Metallarda erkin elektronlar konsentratsiyasi juda yuqori, shuning uchun fotoeffekt natijasida hosil bo`lgan kam miqdordagi qo`shimcha elektronlar metallar o`tkazuvchanligiga ta`sir qilmaydi.
- 2.20. Yoritilmagan fotoqarshilik qarshiligi katta. Om qonunini kichik toklarda ma`lum yaqinlashishda qo`llash mumkin.
- 2.21. $0,4 \text{ m}^2$
- 2.22. 3 marta o`zgargan, ya`ni kamaygan bo`ladi.
- 2.23. 9 marta kamaygan.
- 2.24. To`rtta shayba ketma - ket ulanadi.
- 2.25. a) $n = 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$, b) $n = 2 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$, v) $n = 1 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 2.26. Ge $(D_{n_1} = 263 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{n_2} = 116 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{p_1} = 204 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{p_2} = 90 \text{ sm}^2/\text{s})$
- Si $(D_{n_1} = 131 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{n_2} = 33 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{p_1} = 130 \text{ sm}^2/\text{s}) (D_{p_2} = 13 \text{ sm}^2/\text{s})$
- 2.27. $L_1 = 0,23 \text{ sm}$, $L_2 = 0,15 \text{ sm}$
- 2.28. 1) $\rho = 0,05 \Omega \cdot \text{m}$, $\frac{l}{I_p} \approx 1,48$ 2) $\rho = 0,05 \Omega \cdot \text{m}$, $\frac{l}{I_p} \approx 1,85 \cdot 10^{-4}$
- 2.29. $\sigma_{\text{min}} = 2,2 \cdot 10^{-2} (\Omega \cdot \text{sm})^{-1}$
- 2.30. $n = 8,9 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\sigma = 1,4 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
- 2.31. $1,2 \text{ V}$
- 2.32. $4,46 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$
- 2.33. $1,2 \text{ eV}$
- 2.34. $5,25 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$

3 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari

3.1. f

$$3.2. d = \frac{c}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$3.3. E_{n_{\max}} - E_{n_{\min}} = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2ma^2} \cdot \frac{2}{p}$$

$$3.4. E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} \left[(n+1)^2 \left(1 - \frac{4}{p} \right) - n^2 \right]$$

3.5. $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_L}$ va $\tau = 2$ da $\tau^2 = \frac{\tau_i}{\tau_i}$ bo'lganda 1- ifoda, $\tau = 1$ da 2- ifoda kelib chiqadi.

3.6. 1-holda $r = 0$ hamda $r = 2$ deb olib, $a^2 = \frac{\tau_i}{\tau_i}$ ifodani hisobga olsak,

$$\tau = \frac{\tau_i e^{-\mu^2/2}}{e^{-\mu^2} + a^2}$$

$$3.7. \sigma_0 = \frac{8\pi \ell^2 (2m^* kT)^{3/2}}{3m^* (2\pi \hbar)^3} \tau_{OL} \cdot \mu^*, \quad u_\sigma = \frac{e}{m^*} \tau_{OL} \cdot \mu^{*3/2}$$

$$3.8. \sigma_i = \frac{8\pi \ell^2 (2m^* kT)^{3/2}}{3m^* (2\pi \hbar)^3} \tau_{OL} \cdot \mu^{*3} \quad u_{\sigma_i} = \frac{e}{m^*} \tau_{OL} \cdot \mu^{*3/2}$$

3.9. $\mu \gg 0$ da $A_L = 1$ va $A_i = 1$

3.10. ($T = 300K$), 1) $2,02mV$, 2) $1,62mV$, 3) $1,22mV$, $\alpha_1 \approx 1,58mV$, $\alpha_2 \approx 1,62mV$, $\alpha_3 \approx 1,22mV$

3.11. $\alpha_1 \approx 1,58mV$, $\alpha_2 \approx 1,38mV$, $\alpha_3 \approx 1,18mV$

3.12. $\alpha \approx \frac{k_B}{e} (4 - \mu^*)$ da μ^* ning qiymatiga qarab baholanadi.

$$3.13. \alpha = \frac{4\pi}{n \cdot m^*} \cdot \frac{Ne^2}{\omega^2 \tau}$$

3.14. Ko'rsatma $R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$ da $k = 0$ deb oling.

$$3.15. j(\omega) = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ sm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$3.16. \tau = 4 \cdot 10^{-2} \text{ s}; \tau = 0,1 \text{ s}; \tau = 0,14 \text{ s};$$

3.17. $\tau = \frac{1}{\gamma_0(n_0 + p_0)}$, temperatura ortishi bilan n_0, p_0 - ortadi, τ - kamayadi.

3.18. $\tau = \frac{p}{\gamma_n \cdot n_i^2}$; $\gamma_n = Ap \left(\frac{300}{T} \right)^2$ bo'lgani uchun $\tau \sim cT^2$, ya'ni, $\tau \sim T^2$

$$3.19. \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \frac{1}{400}; \quad \frac{2\tau_1 n_1^2}{n_1^2} = \frac{1}{n_1^2}$$

3.20. Ko'rsatma [4] dagi 6-rasm asosida asoslang. $V_1 = \frac{h^3}{a^3}$

3.21. Ko'rsatma [4] dagi 6-rasm asosida isbotlang.

3.23. $E \approx 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$

3.24. $\Delta E = 1,84 \text{ eV}$, $r = 1 \text{ \AA}$, $n_m = 1,54 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$

3.25. $T_1 \approx 0,47 \text{ K}$, $T_2 \approx 2,7 \text{ K}$; Si uchun $T_1 \approx 0,31 \text{ K}$, $T_2 \approx 1,5 \text{ K}$

3.26. $\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{k_0 T}$ va $\frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{k_0 T}$ aynigan yarimo'tkazgich uchun $\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{ek_0 T}{4} \cdot \frac{F_{\frac{1}{2}}}{F_{\frac{1}{2}}}$ bu

erda $F_{\frac{1}{2}}$ va $F_{\frac{1}{2}}$ - Fermi integrallari

3.27. $D_n = \frac{k_0 T \mu_n}{e}$ va $D_p = \frac{k_0 T \mu_p}{e}$ formulalar bo'yicha berilgan T ning qiymatlarida hisoblanadi.

3.28. $D = \frac{n+p}{\frac{n}{D_n} + \frac{p}{D_p}}$ va $D_p > D > D_n$

3.29. $\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_0 e^{-\frac{x}{L_p}}$ va $L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$

3.30. $\tau = \frac{\mu_d \cdot m}{e} \approx 2,27 \cdot 10^{-12} \text{ s}$

3.31. $\sigma = e \mu_n n_s + e \mu_p n_p$ ifoda orqali isbot qilinadi.

3.32. $\Delta y = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 \Delta \varphi}{m e^2}} \approx 2,3 \text{ mkan}$

3.33. $j_s = \frac{1}{4} n_s e \sqrt{\frac{8 k_0 T}{\pi m \alpha}}$ $j_s = 4,3 \text{ A/sm}^2$

3.34. $\Delta \varphi = \kappa T \ln \frac{N_s}{N_s} \approx 0,6 \text{ V}$

3.35. $J = j_s S = 7,5 \text{ A}$

3.36. $J = \frac{k_0 T}{4e} \sigma_p$, $S = 2,58 \text{ A}$

3.37. $q = \frac{\sigma E (\epsilon \epsilon_0)^{\frac{1}{2}}}{e^{\frac{1}{2}} \mu n^{\frac{1}{2}}} \cdot (\kappa T)^{\frac{1}{2}} \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$

3.38. $\delta = \frac{q}{s} = \frac{n \varphi}{\sqrt{\kappa T}} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{n}} \approx 3,2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{C}}{\text{m}}$ yoki $3,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{C}}{\text{sm}^2}$

3.39. $s = \frac{a}{2\tau} \approx 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

3.40. $\lambda = \frac{v m}{e} \mu$

$$41) j = \lambda T_0 \mu \frac{\Delta U}{\Delta x} = 0,34 A/m^2 \text{ yoki } 34 mkA/sm^2$$

$$42) U_e = 6,21 \cdot 10^{-21} J, P_e = 6,47 \cdot 10^{-26} \frac{kg \cdot m}{s}, K_e = 6,16 \cdot 10^{-9} m^{-1}, \lambda_e = 1 \cdot 10^{-8} m$$

$$43) U_p = 1,15 \cdot 10^{-22} J, P_p = 3,24 \cdot 10^{-26} \frac{kg \cdot m}{s}, K_p = 3,18 \cdot 10^{-8} m^{-1}, \lambda_p = 2 \cdot 10^{-8} m, \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$44) r_{min} = \kappa \frac{e^2}{E_k}, \text{ bu erda } E_k - \text{ elektronlarning o'rtacha kinetik energiyasi}$$

$$45) \sigma = \frac{1}{n g \tau}; \text{ bu erda } n = (n_0 - n_s)^2 \exp\left[-\frac{\Delta E_s}{2kT}\right] \text{ va } n_0 = 2 \left(\frac{mkT}{2\pi \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}, \tau = \frac{3}{8Rg n_s}$$

$$46) 1). \lambda = \frac{1}{\sigma n}; \mu = \frac{e\tau}{m^*} = \frac{e}{\sigma n g m^*}; \lambda = \frac{\mu m^* g}{e}; \mu \sim T^{-\frac{3}{2}} \text{ va } g \sim T^{\frac{3}{2}} \text{ bo'lgani}$$

$$2). \mu = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e\tau}{m^* \frac{5}{2} \kappa^{\frac{3}{2}}} T^{\frac{1}{2}} \sim T^{\frac{3}{2}}$$

$$47) R = \frac{A_v A_n}{(A_v + A_n) e n}; A_v \approx 1,93, A_n \approx 1,18$$

$$48) \text{ Elastik sochilishda } r_p = r_n, r_n = r$$

$$j = e(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} - re(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)[\vec{B} \cdot \vec{E}] \text{ tok k bo'yicha oqsa}$$

$$j_x = j, j_y = j_z = 0$$

$$j_x = e(n\mu_n + p\mu_p)E_x + re(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)BE_y = j$$

$$j_y = e(n\mu_n + p\mu_p)E_y - re(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)BE_x = 0$$

Hu tenglamalarni ε_y ga nisbatan echsak,

$$R = \frac{r}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} j B = R j B. \text{ Bizning hol uchun } r = 1 \text{ bo'gani uchun}$$

$$R = \frac{r}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2};$$

$$a) \text{ Agar } n \gg p \text{ bo'lsa } R \approx -\frac{1}{en}; \text{ b) agar } p \gg n \text{ bo'lsa } R \approx \frac{1}{ep}$$

49) Sochilish asosan akustik fononlarda bo'ladi.

$$50) a = \frac{p}{n} = \frac{\mu_p^2}{\mu_n^2} = 4,26; n = 1,2 \cdot 10^{22} m^{-3}; p = e \cdot n = 5,1 \cdot 10^{22} m^{-3}; m^* = 0,07m;$$

$$b) \rho = 93 mkV; \rho_a = \frac{0,04}{10^1 \cdot 10^{-2,72}} \approx 0,02 \Omega \cdot sm; \mu_n = 3450 \frac{sm^2}{V \cdot s}; \mu_p \approx 810 \frac{sm^2}{V \cdot s}; R = 160 \frac{sm^3}{C}$$

$$51) \varepsilon \approx 1050 \frac{V}{sm}$$

$$52) E_p = -0,05 eV$$

$$53) n = 3,3 \cdot 10^{22} m^{-3}, \mu_n = 212,5 \frac{sm^2}{V \cdot s}$$

$$3.53 \quad p = 1,3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}, \quad \mu_p = 412 \frac{\text{sm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$3.54 \quad E = 0,053 \text{ eV}; \quad r = 0,85 \text{ nm}$$

4 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari

4.1. Aynimagan holdagi neytrallik sharti $p = n$ dan

$$2 \left(\frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_F - E_n}{kT}} = 2 \left(\frac{m_p kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_F - E_p}{kT}}$$

n olamiz. Bu yerdan
$$e^{\frac{2F - (E_n - E_p)}{kT}} = \left(\frac{m_p}{m_n} \right)^{3/2}$$

va bundan
$$F = \frac{E_n + E_p}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p}{m_n}.$$

Elektronlar konsratsyasi esa quyidagiga teng

$$n_i = \sqrt{np} = 2 \left(\frac{(m_n m_p)^{3/2} kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{1/2} e^{-\frac{E_n - E_p}{2kT}}$$

300 va 200 K da konsratsyalar nisbati

$$\frac{n_{300}}{n_{200}} = \left(\frac{300}{200} \right)^3 \exp \left[-\frac{\Delta}{2k} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{200} \right) \right] = 3,6 \cdot 10^3$$

4.2. Xususi yarim o'tkazgichda elektronlar konsratsyasi taqiqlangan soha kengligining temperaturaga bog'liqligini hisobga olganda quyidagiga teng:

$$n = 2 \left(\frac{\sqrt{m_n m_p} kT}{2\pi\hbar^2} \right)^3 e^{\frac{E_n}{2k}} e^{-\frac{\Delta}{2kT}}, \quad \text{bu yerda } E_n = \Delta - 0T.$$

Bundan
$$2 \left(\frac{\sqrt{m_n m_p} kT}{2\pi\hbar^2} \right)^3 e^{\frac{E_n}{2k}} = \frac{n}{T^{3/2}} e^{\frac{\Delta}{2kT}}$$
 ni olamiz va

$$\frac{m_n m_p}{m_0^2} = \frac{(2\pi\hbar^2)^3}{2^{3/2} (kT)^2 m_0^2} n^{1/3} e^{\frac{2\Delta}{3kT} - \frac{2\Delta}{3k}} = 0,21 \text{ kelib chiqadi.}$$

4.3. T_1 va T_2 temperaturada elektronlar konsratsyalari nisbati (4.1 masalaga qarang) quyidagicha:

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2} e^{-\frac{\Delta}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (E_n = \Delta - 0T). \quad \text{Bundan } \Delta = 2k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{n_1 T_2^{3/2}}{n_2 T_1^{3/2}}, \text{ bizning shart}$$

uchun $\Delta = 0,26 \text{ eV}$

4.4. Elektronlar konsratsyasi quyidagiga teng:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{2Q}{(2\pi)^3} \int dk \left\{ 1 + \exp \left[\beta \left(E_c - F + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_1} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_1} + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m_1} \right) \right] \right\}^{-1} = \\
 &= \frac{2Q}{(2\pi)^3} \frac{1}{\hbar^3} (8m_1^2 m_2)^{3/2} (kT)^{3/2} \int dx dy dz \left\{ 1 + \exp \left[\beta (E_c - F + x^2 + y^2 + z^2) \right] \right\}^{-1} = \\
 &= \frac{4\pi Q}{(2\pi\hbar)^3} \frac{\sqrt{\pi}}{2} F_{1/2} [\beta(F - E_c)] (8m_1^2 m_2)^{3/2} (kT)^{3/2} = 2 \left(\frac{m_2 kT}{2\pi\hbar^2} \right) F_{1/2} [\beta(F - E_c)]
 \end{aligned}$$

Bu yerda Q o'tkazuvchan sohaning ekvivalent minimumlar soni, $\beta = 1/kT$. k bo'yicha integrallash natijasi, bu chegaralar to'lgan holatlar sohasida yotma, integrallash chegaralariga bog'liq bo'lmaydi. Bu juda ko'p qiziqarli holatlarda o'rinli, shuning uchun biz k bo'yicha cheksiz chegaralarda integrallab xato qilmaymiz.

Shunday qilib, holatlar effektiv massasi uchun $m = Q^{2/3} (m_1^2 m_2)^{1/3}$ ga ekanmiz. Ge da $m_a = 0.56m_0$, Si da $m_a = 1.08m_0$.

4.5. Dispersiya qonuni (1.3 g) ni δ bo'yicha qatorga yoyib, δ bo'yicha chiziqli holatlar bilan chegaralanamiz: $E_p(k) = E_g - \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \left[1 \pm \frac{3\delta B}{A \pm B} \psi(\theta, \varphi) \right]$ bu yerda $m_{\pm} = m_0 (A \pm B)^{-1}$, $\psi(\theta, \varphi) = \sin^4 \theta \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi + \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{1}{6}$, va φ k vektorining sferik koordinatalardagi burchaklari. Ushbu yaqinlashishda kovaklar konsentratsiyasi quyidagiga teng:

$$\begin{aligned}
 N_{\pm} &= \frac{2}{(2\pi)^3} \int dk \cdot k^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta \cdot \sin \theta \times \left\{ 1 + \exp \left[\frac{\hbar^2 k^2}{2m \pm kT} \left(1 \pm \frac{3\delta B}{A \pm B} \psi(\theta, \varphi) - \eta \right) \right] \right\}^{-1} = \\
 &= \frac{1}{\pi^2} \int dk \cdot k^2 \left\{ \left[1 + \exp \left(\frac{\hbar^2 k^2}{2m_1 kT} - \eta \right) \right] \right\}^{-1} \pm \frac{3\delta B k^2}{A \pm B} \frac{d^2}{dk^2} \times \left[1 + \exp \left(\frac{\hbar^2 k^2}{2m_1 kT} - \eta \right) \right]^{-1} \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta \sin \theta \psi(\theta, \varphi) \right\} = \\
 &= N_{\pm} F_{1,2}(\eta)
 \end{aligned}$$

Bu yerda "1" indeks "engil" kovaklar sohasiga, "2" indeks esa "og'ir" kovaklar sohasiga tegishli, holatlar effektiv soni

$$N_{\pm 1,2} = 2 \left(\frac{m_{1,2} kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

holatlar zichligining effektiv massasi

$$m_{1,2} = m_0 \left[1 \pm \frac{\delta B}{(A \pm B)} \right]$$

Hundan qidirilayotgan effektiv massalar topiladi, $m_1 = 0,043m_0$, $m_2 = 0,32m_0$. Yuqori tartiblarni hisobga olib hisoblanganda, og'ir kovaklar effektiv massasi uchun $m_2 = 0,36m_0$ qiymat olinadi. Germaniy valent sohasidagi holatlar zichligining to'liq effektiv massasi quyidagiga teng:

$$m_p = (m_1^{3/2} + m_2^{3/2})^{2/3} m_0 = (0.043^{3/2} + 0.36^{3/2})^{2/3} m_0 = 0.37m_0$$

4.6. Barcha kovaklar konsentratsiyasidagi yengil kovaklar konsentratsiyasi uchun quyidagini yozish mumkin:

$$\frac{p_1}{p} = \frac{N_{g1}}{N_{g1} + N_{g2}} = \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^{3/2} = 0.04$$

Shunday qilib, germaniydagi yengil kovaklar hamma erkin kovaklarni 4% ni tashkil etadi.

4.7. Neytrallik shartiga ko'ra

$$N_c F_{1/2}(\eta) = N_g e^{\frac{E_g - F}{kT}}$$

Chunki, effektiv massaning kattaligi uchun valent sohadagi kovaklar gazit aynimagan deb olib va (ilova 4) dan foydalanib

$$F_{1/2}(\eta) = \frac{t}{1 - 0.27 t}$$

ni yozamiz, bunda $t = e^{\eta}$. t uchun quyidagi tenglamaga kelamiz:

$$t^2 - 0.27 A t - A = 0, \quad A = \left(\frac{m_p}{m_n} \right)^{3/2} e^{\frac{E_g}{kT}}$$

Ushbu tenglamaning yechimi quyidagiga teng:

$$t = 0.135 A + \sqrt{0.0182 A^2 + A},$$

ayniganlikni hisobga olmaganimizda quyidagi natijaga erishardik

$$t_{\text{ayn}} = \sqrt{A}.$$

$\frac{F - E_g}{(F - E_g)_{\text{ayn}}}$ nisbat quyidagiga teng:

$$\frac{F - E_g}{(F - E_g)_{\text{ayn}}} = \frac{\ln(0.135 A + \sqrt{0.0182 A^2 + A})}{\ln \sqrt{A}}$$

Kovaklar konsentratsiyasiga teng elektronlar konsentratsiyasi quyidagi ifod orqali aniqlanadi.

$$n = p = N_g e^{\frac{E_g}{kT} - \frac{F - E_g}{kT}}$$

$$T = 600 \text{ K da } E_g = 9.8 \cdot 10^{-2} \text{ eV, } A = 4.74; \quad t = 2.91, \quad t_{\text{ayn}} = 2.18;$$

$$\frac{F - E_g}{(F - E_g)_{\text{ayn}}} = 1.37; \quad \frac{n}{n_{\text{ayn}}} = \frac{t_{\text{ayn}}}{t} = 0.75.$$

bu yerdan $n = \frac{N_g}{t} e^{\frac{E_g}{kT}} = 3.3 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$

4.8. Xususi yarimo'tkazgichning solishtirma qarshiligi quyidagiga teng:

$$\rho = \left[n(\mu_n + p\mu_p) \right]^{-1} = (ne\mu_n)^{-1} \frac{b}{1+b} = \frac{b}{2(1+b)e\mu_n} \left(\frac{2\pi\hbar^2}{\sqrt{m_e m_p} kT} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$$

1-100K da $E_g=0,665\text{eV}$, 30 K da esa $E_g=0,773\text{ eV}$ va mos holda

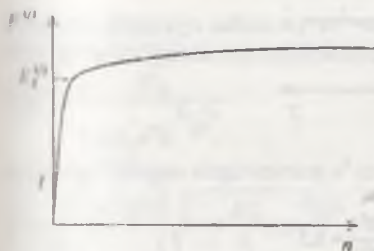
$$\rho_{300} = 57 \Omega \cdot \text{sm}$$

$$\rho_{30} = 1.2 \cdot 10^{61} \Omega \cdot \text{sm}$$

Oxirgi raqamni jiddiy qabul qilish kerak emas, bunday sharoitlarda kirishmalar va ya'na balkim strukturaviy nuqsonlar ham rol o'ynaydi. Biroq qilingan baholash shuni ko'rsatadiki, temperatura xususiy yarimo'tkazgich qarshiligiga kuchli ta'sir ko'rsatadi.

4.9. Elektronlarning to'liq konsentratsiyasi alohida sohalaridagi konsentratsiyalar yig'indisiga teng :

$$n = n_I + n_{II} = \frac{2}{(2\pi)^2} \int_0^\infty dk f(E_I(k)) + \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk f(E_{II}(k))$$



bu yerda $E_I(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_I}$, $E_{II}(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{II}}$,

energiya sanoq boshi qilib I sohaning chegarasi olingan. Bundan quyidagini

olamiz: $n = N_I F_{1/2}(\eta) + N_{II} F_{1/2}\left(\eta - \frac{E_g}{kT}\right)$,

bu yerda N_I va N_{II} I va II sohalaridagi holatlar effektiv soni. Aynimagan hol uchun

13- rasm

$$\eta = \ln \frac{n}{N_I + N_{II} e^{-E_g/kT}}$$

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m_I}{\hbar^2} \right)^{3/2} F^{3/2} \left[1 + \left(\frac{m_{II}}{m_I} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{E_g}{F} \right)^{3/2} \theta(F - E_g) \right], \quad \theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Kuchli aynish holi uchun Fermi sathining konsentratsiyaga bog'lanish grafigi 13- rasmda ko'rsatilgan.

4.10. Yuqori minimumda elektronlar soni quyidagiga teng:

$$n_{II} = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_{E_g}^\infty dk f(E_{II}(k)) = N_{II} e^{\eta} e^{-\frac{E_g}{kT}} = n \frac{\zeta e^{-\frac{E_g}{kT}}}{1 + \zeta e^{-\frac{E_g}{kT}}}$$

bu yerda $\zeta = \frac{N_{II}}{N_I} = \left(\frac{m_{II}}{m_I} \right)^{3/2} = 58$, qidirilayotgan bog'lanish $\frac{n_{II}}{n_I} = \frac{n_{II}}{n - n_{II}} = \zeta e^{-\frac{E_g}{kT}}$

Huquq son qiymatlarini qo'yib, $\frac{n_{II}(300)}{n_I(300)} = 0.8 \cdot 10^{-4}$, $\frac{n_{II}(1000)}{n_I(1000)} \approx 1$ ni topamiz.

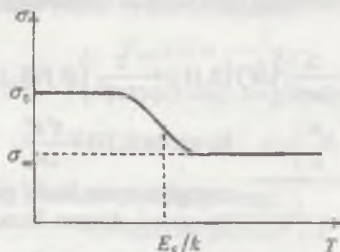
4.11. O'tkazuvchanlikning kattaligi quyidagiga teng:

$$|\sigma| = en_1\mu_1 + en_{11}\mu_{11} = en_1\mu_1 \left(1 + \frac{n_{11}\mu_{11}}{n_1\mu_1} \right) = en\mu_1 \frac{1 + \zeta e^{-\frac{E_s}{kT}} \frac{\mu_{11}}{\mu_1}}{1 + \zeta e^{-\frac{E_s}{kT}} \frac{\mu_1}{\mu_{11}}}$$

$T \ll \frac{E_s}{k}$ da $\sigma \approx \sigma_0 = en\mu_1$, yuqori temperaturalarda

$$\left(T \gg \frac{E_s}{k} \right) \sigma = \sigma_\infty = en \frac{\mu_1 + \zeta \mu_{11}}{1 + \zeta}$$

O'tkazuvchanlikning qiyosiy o'tishi 14 - rasmda ko'rsatilgan.



14- rasm

qidirilayotgan nisbat quyidagiga teng: $\frac{\sigma(1000^\circ)}{\sigma(300^\circ)} \approx 0,5$

4.12. Elektronlar konsentratsiyasi uchun ushbu ifodani yozamiz:

$$n = \frac{L}{(2\pi)^3} \int dk f(E) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty k^2 dk f(E) = \int_0^\infty dE \rho(E) f(E)$$

bu yerda $\rho(E) = \frac{k^2 dk}{\pi^2 dE}$ - holatlar zichligi. Sanoq boshi etib o'tkazuvchanlik sohasining chegarasini olib va k^2 ni E orqali ifodalab topamiz.

$$k^2 = \frac{1}{2\gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8m\gamma E}{\hbar^2}} \right) = \frac{2mE}{\hbar^2} \left(1 + \frac{2m\gamma E}{\hbar^2} \right), \text{ undan } \rho(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \left(1 + \frac{5m\gamma E}{\hbar^2} \right)$$

Shunday qilib (ilova 1 ga qarang) $n = N_c \left[F_{1/2}(\eta) + \frac{15}{2} \frac{m\gamma kT}{\hbar^2} F_{3/2}(\eta) \right]$

4.13. Sanoq boshi etib o'tkazuvchan soha chegarasini qabul qilib va dispersiya qonunini oshkor ko'rinishidan foydalanib holatlar zichligi uchun quyidagini topamiz:

$$\rho(E) = \frac{k^2(E) dk(E)}{\pi^2 dE} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m(0)}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \left(1 + \frac{E}{E_s} \right)^{1/2} \left(1 + 2 \frac{E}{E_s} \right)$$

Aynigan hol uchun elektronlar konsentratsiyasi

$$n = \int_0^{\infty} dE \rho(E) \cdot f(E) = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m(0)}{\hbar^2} \right)^{3/2} F^{3/2} \left(1 + \frac{F}{E_g} \right)^{3/2}, \text{ ga teng.}$$

4.14. Oldingi masala natijasidan foydalanib, $m_d = m(0) \left(1 + \frac{F}{E_g} \right)$ ni topamiz.

Foal konsentratsiya orqali ifodalab, m_d uchun quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$m_d = \frac{m(0)}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2\hbar^2}{m(0)E_g} (3\pi^2 n)^{2/3}} \right].$$

Dispersion qonuni (1.3 j) uchun effektiv massa m^* quyidagiga teng:

$$m^* = \hbar^2 k \frac{dk}{dE} \Big|_{E=F} = m(0) \left(1 + 2 \frac{F}{E_g} \right) = m(0) \sqrt{1 + \frac{2\hbar^2}{m(0)E_g} (3\pi^2 n)^{2/3}}.$$

Topilgan massalar o'zaro quyidagicha bog'langan $m_d = \frac{m(0) + m^*}{2}$.

Kvadratik dispersiya uchun $m_d = m^* = m(\theta)$

4.15. $p \ll n$ bo'lganda neytrallik sharti $n = N_D^+ + p$ dan

$$N_s e^{\eta} = \frac{N_D}{1 + g_D e^{\eta} e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}}}.$$

U olamiz. Olingan tenglamaning e^{η} ga nisbatan yechimi quyidagini beradi:

$$e^{\eta} = \frac{1}{2g_D} e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{N_D}{N_s} g_D e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}}} - 1 \right),$$

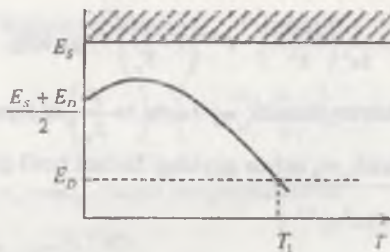
bundan

$$F = E_D + kT \ln \left[\frac{1}{2g_D} \sqrt{1 + 4n_D \frac{N_D}{N_s} e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}}} - 1 \right]. \quad T \rightarrow 0 \quad \text{da} \quad N_s \ll N_D e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}} \quad \text{va}$$

$$F = \frac{E_s + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{g_D N_s(T)}.$$

Yuqori temperaturalarda $N_s \gg N_D e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}}$ bo'lganda $F = E_s - kT \ln \frac{N_s}{N_D}$ ga ega bo'lamiz.

Shunday qilib, temperatura oshishi bilan Fermi sathi $\frac{E_s + E_g}{kT}$ dan ortu boshlaydi, qandaydir maksimumga yetib deyarli chiziqli ravishda kamaya boshlaydi, bu kovaklar konsentratsiyasi sezilsiz bo'lguncha davom etadi. Fermi sathi o'zgarishi 15 - rasmda keltirilgan.



15- rasm

4.16. Oldingi masala yechimiga ko'ra quyidagi shart bajarilganda Fermi sathi donor kirishma sathi bilan mos tushadi:

$$\frac{1}{2g_D} \left(\sqrt{1 + \frac{4g_D N_D}{N_S(T_1)} e^{\frac{E_S - E_D}{kT}}} - 1 \right) = 1$$

(15 - rasmga qarang). Bu quyidagi ifoda bilan aniqlanuvchi temperaturada yuz beradi:

$$kT_1 = \frac{E_S - E_D}{\ln \left\{ \frac{N_S(T_1)}{4g_D N_D} [(2g_D + 1)^2 - 1] \right\}}$$

$$kT_0 = E_S - E_D \text{ va } y = T_0 / T_1 \text{ deb belgilab, } y = \ln \frac{N_S(T_0)}{N_D} + \ln \frac{(2g_D + 1)^2 - 1}{4g_D} - \frac{3}{2} \ln y.$$

ni hosil qilamiz. Qaralayotgan hol uchun $T_0 = 116^\circ$, $N_S(T_0) = 2.5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ Shunday qilib tenglama quyidagi ko'rinishga keladi $y = 6.62 - 1.5 \ln y$. Uning yechimi $y = 4,4$ va $T_1 = 26,2 \text{ K}$. Ushbu temperaturada elektronlar konsentratsiyasi quyidagiga teng:

$$n = \frac{N_S(T_0)}{y^{3/2}} e^{-y} = 3.3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

4.17. Neytrallik shartidan elektronlar konsentratsiyasi uchun quyidagi tenglamani

$$\text{olamiz: } n^2 + \frac{nn_D}{g_D} - \frac{n_D N_D}{g_D} = 0, \quad n_D = N_S e^{\frac{E_D - E_A}{kT}},$$

$$\text{bundan quyidagi kelib chiqadi: } n = \frac{1}{2g_D} \left(\sqrt{n_D^2 + 4g_D n_D N_D} - n_D \right)$$

Kichik temperaturalarda ($n_D \ll 4g_D N_D$ bo'lganda)

$$n = \sqrt{\frac{n_D N_D}{g_D}} = \sqrt{\frac{N_D N_S}{g_D} e^{\frac{E_D - E_A}{kT}}}$$

Agar $n_D \ll g_D N_D$ bo'lsa, u holda $n \approx N_D$ $T = 300 \text{ K}$ da Ge da quyidagiga ega bo'lamiz: $n_D(300) = 0,7 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$, $4g_D N_D = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$. Shunday qilib $n_D \ll 4g_D N_D$ va $n = N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$

4.18. Temperaturaning quyi chegarasi quyidagi tengsizlik bilan aniqlanadi

$$n_D \gg 4g_D N_D, \quad n_D = N_s e^{\frac{E_D - E_s}{kT}}$$

va quyidagi shartdan topiladi:

$$N_s(T_1) e^{\frac{E_D - E_s}{kT_1}} = 4g_D N_D, \quad T_1 = \frac{E_s - E_D}{k \ln \frac{N_s(T_1)}{4g_D N_D}}$$

Hunda esa temperaturaning yuqori chegarasi xususiy konsentratsiyasi kirishmu konsentratsiyasidan kichik bo'lish sharti bilan aniqlanadi: $n_s \ll n$. Shuning uchun yuqori chegara quyidagi tenglamadan topiladi:

$$N_d = N_s e^{\frac{E_s - E_g}{2kT}}, \quad E_s - E_g = \Delta - \xi T.$$

U quyidagiga teng
$$T_2 = \frac{\Delta}{2k \left[\ln \frac{N_s(T_2)}{N_D} + \frac{\xi}{2k} \right]}$$

Quyidagicha belgilash kiritamiz: $T_0^I = \frac{E_s - E_D}{k}$, $T_0^{II} = \frac{\Delta}{2k}$, $y_1 = \frac{T_0^I}{T_1}$, $y_2 = \frac{T_0^{II}}{T_2}$.

U holda chegaralarni aniqlash uchun ikkita tenglamaga ega bo'lamiz:

$$y_1 = \ln \frac{N_s(T_0^I)}{4g_D N_d} - \frac{3}{2} y_1, \quad y_2 = \ln \frac{N_s(T_0^{II})}{N_d} - \frac{3}{2} y_2 + \frac{\xi}{2k}$$

Germaniy uchun ushbu tenglama quyidagicha ko'rinish oladi:

$$\begin{aligned} y_1 &= 5,06 - 1,5 \ln y_1 & y_2 &= 14,95 - 1,5 \ln y_2 \\ T_0^I &= 116 \text{ K} & T_0^{II} &= 45 \cdot 10^3 \text{ K} \\ N_s(T_0^I) &= 2,5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3} & N_s(T_0^{II}) &= 6,2 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3} \end{aligned}$$

bo'lgani uchun bu tenglamalardan

$y_1 = 3,3$; $y_2 = 11,3$; $T_1 = 35 \text{ K}$; $T_2 = 400 \text{ K}$ ni olamiz.

4.19. Oldingi masala yechimiga o'xshab InSb uchun quyidagini olamiz:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0,026 \text{ eV}, & \alpha &= 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}, \\ T_0^I &= 11,6 \text{ K}, & T_0^{II} &= 1510 \text{ K}, \\ N_s(T_0^I) &= 3,5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}, & N_s(T_0^{II}) &= 5,2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}. \end{aligned}$$

Hundan quyidagini olamiz:

$$y_1 = -3,82 - 1,5 \ln y_1; \quad y_2 = 7,13 - 1,5 \ln y_2$$

va oxirgi javob: $y_1 = 0,078$, $y_2 = 4,78$ va $T_1 = 149 \text{ K}$, $T_2 = 316 \text{ K}$

4.20. Neytrallik sharti odatdagi ko'rinishda yoziladi:

$$N_s F_{1/2}(\eta) = \frac{N_D}{1 + g_D e^{\frac{F - E_s}{kT}}}, \quad \eta = \frac{F - E_s}{kT}$$

Fermi integrali uchun esa (ilova 4) ifodani soddalashtirib yozish mumkin:

$$F_{1/2}(\eta) \cong \frac{e^{\eta}}{1 + 0,27e^{\eta}}$$

Natijada quyidagi tenglamaga kelamiz:

$$e^{-\eta} + \frac{1}{g_D} \left(1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s} \right) e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}} e^{\eta} - \frac{N_D}{g_D N_s} e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}} = 0$$

Uning yechimi quyidagicha

$$\eta = e^{-\frac{E_s - E_D}{kT}} \left[\sqrt{\frac{1}{4g_D^2} \left(1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s} \right) + \frac{N_D}{g_D N_s} e^{\frac{E_s - E_D}{kT}}} - \frac{1}{2g_D} \left(1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s} \right) \right],$$

undan

$$F - E_D = kT \ln \left[\sqrt{\frac{1}{4g_D^2} \left(1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s} \right) + \frac{N_D}{g_D N_s} e^{\frac{E_s - E_D}{kT}}} - \frac{1}{2g_D} \left(1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s} \right) \right]$$

$T \rightarrow 0$ da quyidagi tengsizlik o'rinli bo'ladi.

$$\frac{(0,27)^2 N_D}{4g_D N_s} \ll e^{\frac{E_s - E_D}{kT}}$$

Shuning uchun

$$F = \frac{E_s + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{g_D N_s}$$

Agar konsentratsiya yetarlicha katta bo'lsa, Fermi sathi temperaturaning aniq intervalida o'tkazuvchan sohaga tushib qolishi mumkin:

$$y = \sqrt{\frac{1}{4g_D^2} \left[1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s(T_0)} (\ln y)^{3/2} \right]^2 + \frac{N_D}{g_D N_s(T_0)} (\ln y)^{3/2}} - \frac{1}{2g_D} \left[1 - 0,27 \frac{N_D}{N_s(T_0)} (\ln y)^{3/2} \right]$$

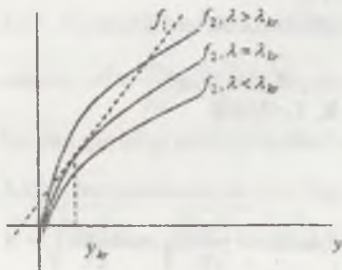
(1). Bu shart Fermi sathi o'tkazuvchan sohaning quyi chegarasi bilan mos tushgan temperaturani aniqlaydi. Biz bu yerda quyidagicha belgilash kiritdik:

$$y = e^{\frac{E_s - E_D}{kT}}, \quad T_0 = \frac{E_s - E_D}{k}$$

Donorlarning kichik konsentratsiyasida (1) tenglama umuman yechimga ega emas va bu holda Fermi sathi o'tkazuvchanlik sohaga tushmaydi.

(1) tenglamani tahlil qilish uchun uni quyidagi ko'rinishda yozib olish qulay:

$$y = -\frac{1}{g_D} + \lambda (\ln y)^{3/2}. \quad (2)$$



16- rasm

Bu yerda $\lambda = 1,27 \frac{Ng}{g_D N_s(T_0)}$ donorlar

konsentratsiyasiga proporsional parametr. λ ning turli qiymatlarida (2) ifodaning chap va o'ng tomonlarini bog'lovchi o'tish 16-rasmda ko'rsatilgan. Bu yerda $f_1(y) = y$, $f_2(y) = \lambda (\ln y)^{3/2}$. Rasmda ko'rinib turibdiki, qandaydir kritik N_D^{kt} konsentratsiyadan kichik kirishma konsentratsiyalarda Fermi sathi hech qanday temperaturada o'tkazuvchan sohaga tushib qolmayapti. Kritik konsentratsiyadan katta konsentratsiyalarda

esa (2) tenglamaning o'ng tarafi bilan berilgan egri chiziq uning chap tomoni

bilan berilgan to'g'ri chiziq bilan ikki nuqtada kesishyapti. Bu ikki nuqta temperatura intervalining chegaralarini ifodalaydi va bu intervalda Fermi sathi o'tkazuvchan sohada yotadi. (2) va quyidagi tenglama (3) $1 = \frac{3}{2} \lambda \frac{(\ln y)^{3/2}}{y}$ ning

birgalikdagi yechimi Fermi sathi o'tkazuvchan sohasining quyi chegarasida yotish kritik temperaturasi T_w va kritik konsentratsyasini aniqlaydi. (3) tenglamadan λ ni topib (2) tenglamaga qo'yib, kritik temperaturani aniqlash tenglamasini hosil qilamiz: $y = -\frac{1}{g_D} + \frac{2}{3} y \ln y$. $g_D=2$ bo'lganda oxirgi

tenglamaning yechimi $y_w = 5,2$. Shunday qilib, germaniyda (4.18 masalaga qarang), InSb uchun (4.19 masalaga qarang)

$$y_w = e^{T_0/T_w} = 5,2; \quad T_w = \frac{T_0}{\ln 5,2} = \frac{116}{1,65} = 70K;$$

$$N_D^w = \frac{2g_D}{3} \cdot \frac{y_w}{(\ln y_w)^{3/2}} \cdot \frac{N_s(T_0)}{1,27} \approx 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

4.21. Kovaklar konsentratsyasi doimiy va N_s ga teng bo'ladigan temperatura intervali chegaralarini baholaylik. 4.18 - masaladagi kabi quyidagi tenglamalarni yechish zarur:

$$y_1 = \ln \frac{N_s(T_0^I)}{4g_D N_a} - \frac{3}{2} y_1,$$

$$y_2 = \ln \frac{N_s(T_0^{II})}{N_a} - \frac{3}{2} y_2 + \frac{\xi}{2k}.$$

Kremniy uchun

$$\Delta = 1,21 \text{ eV}, \quad \xi = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K};$$

$$T_0^I = \frac{E_a - E_v}{k} = 520 \text{ K}, \quad T_0^{II} = \frac{\Delta}{2k} = 7020 \text{ K};$$

$$N_s(T_0^I) = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}, \quad N_s(T_0^{II}) = 1,3 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}.$$

Shunday qilib, tenglamalar quyidagi ko'rinishni oladi:

$$y_1 = 4,18 - 1,5 \ln y_1, \quad y_2 = 11,09 - 1,5 \ln y_2.$$

Ularning yechimlari quyidagicha:

$$y_1 = 2,69, \quad y_2 = 7,98;$$

$$T_1 = 194 \text{ K}, \quad T_2 = 879 \text{ K}.$$

Shunday qilib, xona temperaturasida $p=N_s=10^{17} \text{ sm}^{-3}$. Namuna solishtirma

qar hiligi quyidagicha: $\rho = \frac{1}{pe\mu_p} = 0,62 \Omega \text{ sm}$

30 K temperaturada kovaklar konsentratsyasi

$$p = \sqrt{\frac{N_s N_a}{g_a}} e^{\frac{E_a - E_g}{2k}} = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3} \text{ ga teng.}$$

4.22. Kirishma sohasida erkin kovaklar konsentratsyasi kichik. Fermi sathi esa taqiqlangan sohaning yuqori yarmida yotadi; shuning uchun:

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + g_a \exp\left(\frac{E_a - E_s}{kT}\right)} \approx N_a$$

Shuning uchun neytrallik sharti quyidagi ko'rinishga ega $n + N_a = \frac{N_a}{1 + g_D \frac{n}{n_D}}$

Bu yerda $n_D = N_a \exp\left(\frac{E_s - E_D}{kT}\right)$.

Bundan $n = \frac{1}{2g_D} \left[\sqrt{n_D^2 + 2N_D(2N_D - N_a)n_D + g_D^2 N_a^2} - (n_D + g_D N_a) \right]$

kichik temperaturalarda ($n_D \ll N_a$ bo'lganda)

$$n = \frac{1}{g_D} \left(\frac{N_D}{N_a} - 1 \right) N_a e^{-\frac{E_D - E_s}{kT}}$$

va qidirilayotgan faollashtirish energiyasi $E_s - E_D$ ga teng.

4.23. Oldingi masala yechimiga ko'ra $\frac{2g_D(N_D - N_a)n_D}{(n_D + g_D N_a)^2} \ll 1$ bo'lganda

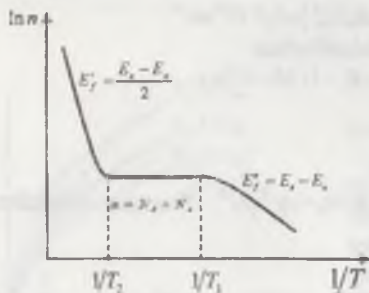
$$n = \frac{n_D(N_D - N_a)}{(n_D + g_D N_a)} = \frac{N_D - N_a}{1 + g_D \frac{N_a}{N_D}}$$

ni olamiz.

4.24. 25 K da $N_a = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, $n_D = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$. Shunday qilib

$$\frac{2g_D n_D (N_D - N_a)}{(n_D + g_D N_a)^2} = 0.2 \text{ va oldingi masala natijasini qo'llab, quyidagini olamiz:}$$

$$n \approx \frac{N_D - N_a}{1 + g_D \frac{N_a}{N_D}} = 1.1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$



17-rasm

4.25. Kichik temperaturalar sohasi $T < T_1$ va katta temperaturalar sohasi $T > T_2$ uchun $\ln n$ ning temperaturaga bog'liqligi quyidagi grafikdagidek tavsiflangan. $T < T_1$ - past temperaturalar sohasi va $T > T_2$ sohada $\ln n$ ning temperaturaga bog'liqligi $n = \text{const} - \frac{E_f}{kT}$,

bunda E_f - mos faollashtirish energiyasi bo'lib (17- rasm), yuqori temperaturalar sohasida $E_f = \frac{E_s - E_a}{2}$ ga teng, past temperaturalar sohasida

$E_f = E_s - E_a$ ga teng.

$T_1 < T < T_2$ intervalda elektronlar konsentratsiyasi deyarli o'zgarmaydi va $N_g - N_a$ ga teng.

4.26. Sohaning quyi chegarasi quyidagi shartdan aniqlanadi:

$$\frac{1}{g_D} \left(\frac{N_D}{N_a} - 1 \right) N_s e^{\frac{E_s - E_D}{kT_1}} = N_D - N_a, \text{ bu nuqta } n = N_D - N_a - \text{ga teng bo'lib, plato bilan boshlanish va } \ln n \text{ ning } T \text{ ga bog'lanishning kichik temperaturalardagi boshlanish nuqtasini belgilaydi. Bundan } T_1 = \frac{E_s - E_D}{k \ln \frac{N_s(T_1)}{g_D N_a}}$$

elektronlar xususiy konsentratsiyasi bilan aniqlanadi: $n = N_s e^{\frac{E_s - E_D}{kT_1}} = N_D - N_a$

Shuning uchun $T_2 = \frac{\Delta}{2k \left[\ln \frac{N_s(T_2)}{N_D - N_a} + \frac{\xi}{2k} \right]}$ Mishiyaq va alyuminiyli kremniy uchun

$$E_s - E_a = \Delta - \xi T = (1,21 - 2,8 \cdot 10^{-4}) \text{ eV}$$

$$T_0^I = \frac{E_s - E_D}{k} \cong 580 \text{ K}, \quad y_1 = \frac{T_0^I}{T_1}$$

$$T_0^II = \frac{\Delta}{2k} \cong 7,02 \cdot 10^3 \text{ K}, \quad y_2 = \frac{T_0^II}{T_2}$$

Berilgan son qiymatlarni o'rniga qo'yib, quyidagi tenglamaga kelamiz:

$$y_1 = \ln \frac{N_s(T_0^I)}{g_D N_a} - \frac{3}{2} \ln y_1, \quad y_2 = \ln \frac{N_s(T_0^II)}{N_D - N_a} + \frac{\xi}{2k} - \frac{3}{2} \ln y_2.$$

U tenglama yechimlari quyidagicha: $y_1 = 10,4 - 1,5 \ln y_1, \quad y_2 = 16,8 - 1,5 \ln y_2$ va

$$y_1 = 7,4, \quad y_2 = 13,$$

$$T_1 = 78 \text{ K}, \quad T_2 = 540 \text{ K}.$$

4.27. Nomuvozanatli konsentratsiya relaksatsiyasi quyidagi qonunga bo'ysunadi

$$\frac{d\Delta p}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau}$$

Hundan esa quyidagini topamiz:

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

$$\frac{\Delta p(t_1)}{\Delta p(t_2)} = \exp\left(\frac{t_2 - t_1}{\tau}\right)$$

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Delta p(t_1)}{\Delta p(t_2)}} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{2,31} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ s}.$$

4.28. Statsionarlik shartiga ko'ra $g = \frac{\Delta p}{\tau}, \quad g = \alpha l$. Shuning uchun

$$\Delta p = \frac{\alpha}{\tau} = 100 \cdot 5 \cdot 10^{13} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

va

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_a} = \frac{e \Delta p (\mu_n + \mu_p)}{e n_0 \mu_n} = \frac{\Delta p}{n_0} \left(1 + \frac{1}{b}\right) = \frac{10^{14}}{10^{15}} \left(1 + \frac{1}{2,1}\right) = 0,15.$$

4.29. Nomuvozanatli konsentratsiyalar so`nishi quyidagi qonunga bo`ysunadi

$$u = \frac{d\Delta n}{dt} = -a \left[(n_0 + \Delta n) \left(\frac{n_0^2}{n_0} + \Delta n \right) - n_0^2 \right] = a [(\Delta n)^2 + n_0 \Delta n], \quad t=0 \text{ da } \Delta n = \Delta n(0)$$

boshlang`ich shart bo`yicha bu tenglamani integrallab quyidagini olamiz:

$$at = \frac{1}{n_0} \ln \frac{n_0 + \Delta n}{\Delta n} + const, \quad \Delta n = \frac{\Delta n(0) n_0}{(\Delta n(0) + n_0) e^{n_0 a t} - \Delta n(0)}$$

4.30. (2.7) formuladan kuchsiz uyg`otilgan hol uchun quyidagini olamiz:

$$\tau = \frac{1}{\alpha N_t} \frac{n_0 + n_1 + p_0 + p_1}{n_0 + p_0}$$

Bu yerdagi konsentratsiyalarni hisoblaylik:

$$n_0 = \frac{1}{\rho e \mu_n} = 3.3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}, \quad p_0 = \frac{n_0^2}{n_0} = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}, \quad n_1 = p_1 = n_i = 8 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}.$$

Bundan esa $\alpha = \frac{1}{\tau N_t} = \frac{n_0 + p_0 + 2n_1}{n_0 + p_0} \approx 2.9 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^3 / \text{s}$ va $S = \frac{\alpha}{v_T} \approx 2.5 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$

4.31. Bizning sharoitda, (2.7) dan, $\tau = \frac{1}{N_t \alpha_p} \left(1 + \frac{n_1}{n_0} \right)$ ni olamiz. Shartga ko`ra

$T < 200\text{K}$ da $\tau \approx \frac{1}{\sqrt{T}}$ va $\alpha_p = v_T s_p \approx \sqrt{T}$ ekanligidan bu soha uchun $\tau = \frac{1}{N_t \alpha_p}$

deb hisoblash mumkin. Bu yerdan $S_p = \frac{1}{\tau N_t v_T} \mathcal{G}_T(T=200\text{K}) = 0.96 \cdot 10^7 \text{ sm} / \text{s}$,

$$S_p = 2.6 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2.$$

Endi $T=300\text{K}$ da n_1 ni (1) dan, keyin $E_S - E_i$ ni $E_S - E_i = kT \ln \frac{N_S}{n_1}$ dan topamiz:

$$\mathcal{G}_T(T=300\text{K}) = 1.17 \cdot 10^7 \text{ sm} / \text{s}$$

$$n_1 = n_0 (\alpha N_t \alpha_p - 1) = 9.3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}, \quad N_S(T=300\text{K}) = 1.06 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

Shunday qilib, $E_S - E_i = 0.32 \text{ eV}$ ni olamiz.

4.32. (2.7) formulaga ko`ra muvozanatdan kichik chetlashishda $n_0 \approx n_1$ da

yashash vaqti maksimal bo`ladi: $\tau_{\text{min}} = \tau_{n_0} \frac{p_1}{2n_1}$ va $\tau_2 = \tau_{n_0} \frac{p_1 + p_{02}}{p_{02}}$.

Bu yerdan p_1 va E_i ni topish mumkin: $p_1 = \frac{p_{02}}{\frac{p_{02}}{2n_1} \tau_2 - 1} = 1.3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$,

$E_i - E_s = kT \ln \frac{N_S}{p_1} = 0.26 \text{ eV}$. Endi tutilish koeffitsentlarini topish mumkin:

$$\alpha_n = \frac{1}{N_t \tau_{n_0}} = \frac{p_1}{N_t \tau_{\text{max}} 2n_1} = 4.4 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^3 / \text{s}, \quad \alpha_p = \frac{1}{N_t \tau_{p_0}} = \frac{1}{N_t \tau_1} = 62 \cdot 10^2 \text{ sm}^3 / \text{s},$$

$$S_n = \frac{\alpha_n}{\mathcal{G}_T} = 3.8 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2, \quad S_p = \frac{\alpha_p}{\mathcal{G}_T} = 5.3 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$$

4.33. Bizning ikki holi uchun yashash vaqtlari uchun ifoda quyidagiga teng:

$$\tau = \frac{1}{\alpha_p N_p} \left(1 + \frac{n_1}{n_0 + \Delta n} + \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \cdot \frac{\Delta n}{n_0 + \Delta n} \right), \quad \tau_0 = \frac{1}{\alpha_p N_p} \left(1 + \frac{n_1}{n_0} \right).$$

Hundan
$$\left(1 + \frac{n_1}{n_0} \right) \frac{\tau}{\tau_0} = 1 + \frac{n_1}{n_0 + \Delta n} + \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \cdot \frac{\Delta n}{n_0 + \Delta n}$$

Ushbu tenglama koeffitsentlarini hisoblab quyidagini topamiz:

$$n_1 = N_s \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{kT}\right) = 4,7 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}, \quad \frac{n_1}{n_0} = 4,66, \quad \frac{\tau_1}{\tau_0} = 2,35$$

Bu yerdan tutilish koeffitsiyentlari nisbatiga teng bo'lgan tutilish kesimlar nisbatini topish mumkin: $\frac{S_p}{S_n} = \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \approx 89$.

4.34. Qaralayotgan sharoitda yashash vaqtlari quyidagiga teng:

$$\tau_0 = \frac{1}{N_p \alpha_p} \left(1 + \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \frac{p_1}{n_0} \right), \quad \tau_1 = \frac{1}{N_p \alpha_p} \left(1 + \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \frac{p_1 + \Delta n}{n_0 + \Delta n} \right)$$

hunga kirgan kattaliklarni hisoblaymiz: $n_0 = \frac{1}{\rho_0 \epsilon \mu_n} = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$,

$$p_1 = N_p \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}, \quad \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \cdot \frac{b}{1+b} = 0,2$$

(1) va (2) dan tutilish koeffitsentlari nisbatini topamiz:

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_n} = \frac{1 - \frac{\tau_0}{\tau_1}}{\frac{p_1 + \Delta n}{n_0 + \Delta n} \frac{\tau_0}{\tau_1} - \frac{p_1}{n_0}}, \quad \frac{\tau_0}{\tau_1} = 0,61. \quad \text{Hundan } \frac{\alpha_p}{\alpha_n} = \frac{0,39}{0,089} \approx 4,4.$$

Undan esa $\tau_{p0} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha_p p_1}{\alpha_n n_0}} \approx 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, $\tau_{n0} = \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \tau_{p0} \approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

4.35. Kichik temperaturalarda chuqur akseptor sathlar donorlar bilan kompensatsiya hisobiga to'ldi: $N_D = N_a^- = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $N_s^0 = 9 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$. Quyidagi tengsizliklar o'rinli $N_s^0 N_a^- \gg n_0, p_0, n_1, p_1$.

Shuning uchun injeksiya darajasini kichik deb olib ($\Delta n, \Delta p \ll N_s^-$), quyidagign ega bo'lamiz:

$$\begin{aligned} \tau_n &= \frac{1}{\alpha_n N_s^0}, & \tau_p &= \frac{1}{\alpha_p N_s^-}, \\ \Delta n &= g \cdot \tau_n = 10^{14} \text{ sm}^{-3}, \\ \Delta p &= \Delta n \frac{\tau_p}{\tau_n} = \Delta n \frac{S_n}{S_p} \frac{N_s^0}{N_s^-} = 9 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}, \\ \tau_p &= \tau_n \frac{\Delta p}{\Delta n} = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ s}. \end{aligned}$$

$$\alpha_n = \frac{1}{\tau_n N_n^0} = 1,1 \cdot 10^{-11} \text{ sm}^3 / \text{s},$$

$$\alpha_p = \frac{S_p}{S_n} \alpha_n = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^3 / \text{s}$$

4.36. (2.9) umumiy formulani tahlil qilib ko'ramiz. Fermi sathi joylashishiga qarab E_1 va E_2 iarni quyidagicha hisoblash mumkin: $n_0/p_0 \ll 1$, $n_1/p_0 \ll 1$, $p_2/p_0 \ll 1$ ekanligini hisobga olib,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{N_1}{1 + \frac{P_1}{P_0}} \left(\alpha_{n1} + \frac{\alpha_{n2} \frac{P_1}{P_0}}{1 + \frac{\alpha_{n2} \cdot n_2}{\alpha_{p1} \cdot P_0}} \right)$$

ni olamiz. Ushbu ifodani empirik ifoda bilan solishtirsak, tajribadagi yuqori temperaturali plata quyidagi holda o'rinli $\frac{\alpha_{n2} \cdot n_2}{\alpha_{p1} \cdot P_0} \ll 1$. Bu holda quyidagini

olamiz: $\tau = \frac{1}{N_1} \cdot \frac{P_0 + P_1}{\alpha_{n1} P_0 + \alpha_{n2} P_1}$ $p_1 = N_1 \exp\left(\frac{E_g - E_1}{kT}\right)$ ni hisobga olib,

soddalashtirishlardan so'ng,

$2N_1 \tau = \left(\frac{1}{\alpha_{n1}} + \frac{1}{\alpha_{n2}}\right) - \left(\frac{1}{\alpha_{n2}} - \frac{1}{\alpha_{n1}}\right) \text{th}\left(\frac{E_g - E_p}{2kT} - \frac{1}{2} \ln \frac{\alpha_{n1} P_0}{\alpha_{n2} N_g}\right)$ ni hosil qilamiz. Empirik

formula xuddi shunga o'xshash ko'rinishga ega $2N_1 \tau = A - B \text{th}\left(\frac{T_0}{T} - \chi\right)$. Bu yerda

$A = 3,24 \cdot 10^8 \text{ sm}^{-3} \cdot \text{s}$, $B = 2,48 \cdot 10^8 \text{ sm}^{-3} \cdot \text{s}$, $T_0 = 955 \text{ K}$, $\chi = 4,41$.

Bu yerdan quyidagilarni topamiz:

$$\alpha_{n1} = \frac{2}{A - B} = 2,64 \cdot 10^{-8} \text{ sm}^3 / \text{s}, \quad \alpha_{n2} = \frac{2}{A + B} = 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^3 / \text{s}$$

$$p_0 = N_g \frac{\alpha_{n2}}{\alpha_{n1}} e^{-2\chi} = 2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3} \quad E_1 = E_g + 2kT_0 = E_g + 0,17 \text{ eV}$$

200 K da tutilish kesimlarini aniqlash uchun quyidagini topamiz.

$$g_T = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = 0,96 \cdot 10^7 \text{ sm} / \text{s}. \text{ Oxir - oqibat}$$

$$S_{n1} = \frac{\alpha_{n1}}{g_T} \approx 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ sm}^2, \quad S_{n2} \approx 3,7 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2 \text{ ni topamiz.}$$

4.37. (2.10) tenglamaga o'xshash quyidagini yozish mumkin:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - u_n = g - \frac{\Delta p}{\tau_r} \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} = g - \frac{\Delta p}{\tau_r} - \frac{\Delta p}{\tau_1} + \frac{\Delta p}{\tau_2}, \quad \Delta p_1 = \Delta n - \Delta p. \quad (2)$$

Statsionar sharoitda $\Delta p = g\tau_r$, $\Delta p_i = \frac{\tau_2}{\tau_1} \Delta p$, $\Delta n = \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \Delta p$. Relaksatsiya hodisasida Δn va Δp o'zlarini ikkita eksponensial funksiyalar kombinatsiyasi shaklida ifodalash mumkin: $\Delta n = Ae^{-k_1 t} + B e^{-k_2 t}$, $\Delta p = Ce^{-k_1 t} + De^{-k_2 t}$. (2) ni differensiallab, $\frac{d\Delta n}{dt}$ ni

(1) orqali ifodalab karakteristik tenglamalar hosil qilamiz: $k^2 - \frac{k}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} = 0$. Bu

$$\text{yerdagi } \frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}$$

Uning yechimlari $k_{1,2} = \frac{1}{g\tau_r} \pm \sqrt{\frac{1}{4\tau_r^2} - \frac{1}{\tau_1 \tau_2}}$ (3). (1) tenglamadan quyidagilar kelib

chiqadi: $C = \tau_r k_1 A$, $D = \tau_r k_2 B$. Boshlang'ich shartlardan

$$A + B = g\tau_r \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \quad C + D = g\tau_r. \text{ Bularidan u koeffitsiyentlar aniqlanadi.}$$

Oxirgi javob quyidagicha ko'rinishlarda bo'ladi:

$$\Delta n = \frac{g\tau_r}{k_1 - k_2} \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \left\{ \left[\frac{1}{\tau_r} - k_2 \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \right] e^{-k_1 t} + \left[k_1 \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) - \frac{1}{\tau_r} \right] e^{-k_2 t} \right\}$$

$$\Delta p = \frac{g\tau_r^2}{k_1 - k_2} \left\{ k_1 \left[\frac{1}{\tau_r} - k_2 \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \right] e^{-k_1 t} + k_2 \left[k_1 \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) - \frac{1}{\tau_r} \right] e^{-k_2 t} \right\} \quad (4)$$

4.38. Statsionar sharoitlarda

$$\Delta p = g\tau_r = 10^{19} \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}, \quad \Delta n = \Delta p \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) = 2,2 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}.$$

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta p \cdot \mu_p + \Delta n \cdot \mu_n}{n_0 \mu_n} = \frac{\Delta p \left[1 + b \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \right]}{n_0 b} = \frac{2 \cdot 10^{13}}{5 \cdot 10^{15}} \left(\frac{1}{2,1} + 11 \right) = 0,046$$

o'rinni. Oldingi masalaning (3) ifodasiga ko'ra

$k_1 = 5,02 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, $k_2 = 2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ ni topamiz. Ushbu masaladagi (4) ifoda quyidagi ko'rinish oladi:

$$\Delta n = 2,2 \cdot 10^{14} (0,58 e^{-k_1 t} + 10,42 e^{-k_2 t}) \text{ sm}^{-3},$$

$$\Delta p = 2 \cdot 10^{13} (0,58 e^{-k_1 t} + 0,42 e^{-k_2 t}) \text{ sm}^{-3}$$

Aniqlik, $\frac{1}{k_1} \approx \tau_2$ tartibda vaqt o'tgach nomuvozanatli o'tkazuvchanlikning "tez" komponentasi yo'qoladi, keyin $\frac{1}{k_1} \approx \tau_2$ ga mos holda bog'lanishda so'nuvchan xarakterli "dum" kuzatiladi.

4.39. Umumiy (2.6) ifodada $\frac{\Delta p_i}{\Delta p}$ da nisbat uchun bizning holda p_0, p_1, n_1 larni hisobga olmasa ham bo'ldi. Bundan

$$\frac{\Delta p_i}{\Delta p} = \frac{\alpha_p N_i}{\alpha_n n_c}, \alpha_n = \frac{N_i}{n_0} \alpha_p \frac{\Delta p}{\Delta p_i} = \frac{10^{14}}{4 \cdot 10^{24}} \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{24} \approx 1,04 \cdot 10^{-20} \text{ sm}^3 / \text{s}$$

Tuzoqlar konsratsyasini boshqa qiymatida

$$\frac{\Delta p_i}{\Delta p} = 0,24 \tau_p = \frac{1}{N_{c1} \cdot \alpha_p} = \frac{1}{10^{12} \cdot 10^{-2}} = 10^{-4} \text{ s}, \quad \tau_n = \left(1 + \frac{\Delta p_i}{\Delta p}\right) \tau_p = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ s}.$$

4.40. Eynshteyn ifodasi (3.7) dan foydalanib, $D_n = 98 \text{ sm}^2 / \text{s}$ ni olamiz.

4.41. (3.5) formulaga asosan $D_n = \frac{n \mu_n kT}{e \frac{dn}{d\eta}}$ (1) bu yerda $\eta = \frac{F - E_s}{kT}$ (1.5) va

(4.43) ga asosan, $n = \frac{8\pi(2m_e kT)^{3/2}}{3h^3} \eta^{3/2}$ ni topamiz. Bundan esa

$$\eta = \left(\frac{3h^3}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{1}{2m_e kT} n^{2/3}, \quad \frac{1}{kT} \frac{dn}{d\eta} = 3m_e \left(\frac{3h^3}{8\pi}\right)^{-2/3} n^{1/3}. \quad (2)$$

(2) ni (1) ga qo'yib, quyidagini olamiz: $D_n = \frac{h^2}{3e} \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{\mu_n}{m_n} n^{2/3} = 3,6 \text{ sm}^2 / \text{s}$.

4.42. 4.4 - masala yechimidan va (1.5), (1.6) va (ilova 3) dan foydalanib

$n = \frac{8\pi Q}{3h^3} (8m_x m_y m_z)^{1/2} \eta^{3/2} (kT)^{3/2}$ ni topamiz, yoki $m_d = Q^{2/3} (m_x m_y m_z)^{1/3}$ deb olib,

$$n = \frac{8\pi(2m_d kT)^{3/2}}{3h^3} \eta^{3/2}, \quad \eta = \left(\frac{3h^3}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{n^{2/3}}{2m_d kT}, \quad D = \frac{h^2}{3e} \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{\mu_n}{m_d} n^{2/3}$$

4.43. Eynshteyn ifodasi va $n = p = n_i$ shartdan foydalanib quyidagini toping:

$$D = \frac{2n_i}{n_i \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_n}\right)} = \frac{2kT}{e \left(\frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{\mu_p}\right)} = \frac{2kT\mu_n}{e(1+b)} = 63 \text{ sm}^2 / \text{s}.$$

4.44. Ushbu masala uchun uzluksizlik tenglamasi quyidagicha yoziladi (2-rasmga qarang):

$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} + g_0 - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$. Chegaraviy shartlar quyidagicha:

$D_p \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0} = s\Delta p|_{x=0}, \quad \Delta p \rightarrow g_0 \tau_p$ agar $x \rightarrow \infty$. Tenglama echimi quyidagi

ko'rinishga ega holadi: $\Delta p(x) = g_0 \tau_p + C_1 e^{-\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{\frac{x}{L_p}}$.

Chegaraviy shartlardan $C_2 = 0$, $-\frac{D_p}{L_p} C_1 = s(C_1 + g_0 \tau_p)$, $C_1 = -\frac{g_0 \tau_p^2 s}{L_p + s\tau_p}$.

Nomuvozanatli zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi Δp ni uzluksizlik

tenglamasidan topamiz: $\Delta p(x) = g_0 \tau_p \frac{s \tau_p \left(1 - \rho \frac{x}{L_p} \right) + L_p}{L_p + s \tau_p}$, bu yerda D_p - diffuziya

koeffitsenti, kichik darajali injeksiyada doimiy, shuning uchun (2) tenglamani quyidagi ko`rinish oladi: $\Delta p(0) = g_0 \tau_p \frac{L_p}{L_p + s \tau_p}$.

1. dan ancha katta qalinlikdagi namuna uchun $\Delta p(0) = 0,88 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$

4.45. Berilgan hol uchun uzluksiz tenglamasi va chegaraviy shartlar quyidagi

ko`rinishda bo`ladi (2- rasmga qarang): $D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} + g_0 e^{-\alpha x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$,

$$g_0 = I a, \quad D_p \left. \frac{d \Delta p}{dx} \right|_{x=0} = s \Delta p|_{x=0}, \quad \Delta p \rightarrow 0, \quad \text{agar } x \rightarrow \infty.$$

Tenglamani umumiy yechimini quyidagicha ko`rinishda yozish mumkin:

$$\Delta p(x) = C_1 e^{-s x / \tau_p} + C_2 e^{s x / \tau_p} - \frac{g_0 \tau_p e^{-\alpha x}}{L_p^2 \alpha^2 - 1}.$$

C_1 va C_2 ni chegaraviy shartlardan aniqlab, Δp ni topamiz:

$$\Delta p(x) = \frac{g_0 \tau_p}{L_p^2 \alpha^2 - 1} \left(\frac{\alpha L_p^2 + s \tau_p}{L_p + s \tau_p} e^{-s x / \tau_p} - e^{-\alpha x} \right)$$

$$\Delta p(0) = g_0 \tau_p \frac{L_p}{(L_p \alpha + 1)(L_p + s \tau_p)} \approx g_0 \tau_p \frac{1/\alpha}{L_p + s \tau_p}$$

bizning sharoitda $L_p \alpha \gg 1$ bo`lgani uchun, $\Delta p(0) = 0,5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$.

4.46. Stasionar sharoitda (2- rasmga qarang): $j_n + j_p = 0$ va

$$\sigma E + e D_n \frac{d \Delta n}{dx} - e D_p \frac{d \Delta p}{dx} = 0.$$

Bu yerda $\sigma = \sigma_p + \sigma_n$, $\sigma_p = \mu_p e n$, $\sigma_n = \mu_n e n$,

Bulardan Dember - effekt maydoni kuchlanganligini aniqlaymiz :

$$E = -\frac{e}{\sigma} \left(D_n \frac{d \Delta n}{dx} - D_p \frac{d \Delta p}{dx} \right) = -\frac{e}{\sigma} \left((D_n - D_p) \frac{d \Delta p}{dx} - D_n \frac{d(\Delta p - \Delta n)}{dx} \right) =$$

$$= -\frac{e}{\sigma} \frac{d}{dx} \left[(D_n - D_p) \Delta p - D_n (\Delta p - \Delta n) \right]$$

$E = E' + E''$ deb hisoblaymiz va bu yerda

$$E' = -\frac{e}{\sigma} \frac{d \Delta p}{dx} (D_n - D_p), \quad E'' = \frac{e}{\sigma} D_n \left(\frac{d \Delta p}{dx} - \frac{d \Delta n}{dx} \right).$$

Agar $|\Delta p - \Delta n| \ll \Delta p$ shart bajarilsa, u holda E' ga nisbatan E'' qo`shiluvchi hadni nisbatan hisobga olmasa ham bo`ladi. Bu holda $\Delta p - \Delta n$ ni topish uchun Puasson tenglamasiga E' ni qo`ysak bo`ladi:

$$|\Delta p - \Delta n| = \frac{\varepsilon(D_n - D_p)}{4\pi\sigma_0} \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} \quad (1)$$

Muvozanatda bo'lmagan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi Δp ni uzluksizlik tenglamasidan aniqlaymiz:

$$\operatorname{div}(D \operatorname{grad} \Delta p) - \frac{\Delta p}{\tau} = 0, \quad (2)$$

bu yerda D - biquatb diffuziya koeffitsienti bo'lib, kichik maromdagi injeksiyada doimiydir.

U holda (2) tenglama quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L^2} = 0, \quad L = \sqrt{D\tau}$$

L dan ko'p marta katta qalinlikdagi namuna uchun tenglama yechimi

$$\Delta p(x) = \Delta p_0 e^{-x/L}, \quad (3)$$

ko'rinishda bo'ladi. Bu yerda Δp_0 - muvozanatda bo'lmagandagi zaryad tashuvchilar yuzadagi ($x=0$ dagi) konsentratsiyasi. (3) dan Δp ni (2) tenglamaga qo'yamiz:

$$\frac{|\Delta p - \Delta n|}{\Delta p} = \frac{\varepsilon(D_n - D_p)}{4\pi\sigma_0 L^2} = \frac{\varepsilon D_n (1 - b^{-1})}{4\pi e \mu_n (n_0 + b^{-1} p_0) L^2} = \frac{\varepsilon k T (b - 1)}{4\pi e^2 (b n_0 + p_0) L^2}$$

$n_0 \gg p_0$ shart uchun quyidagi tenglikni olamiz: $\frac{|\Delta p - \Delta n|}{\Delta p} = \frac{\varepsilon k T (b - 1)}{4\pi e^2 b n_0 L^2}$

Qaralayotgan sharoitlarda $\frac{|\Delta p - \Delta n|}{\Delta p} = 2,7 \cdot 10^{-7} < 10^{-6}$, natija shuni ko'rsatadiki, bu

sharoitlarda lokal elektroneytrallik talabi katta darajali aniqlikda bajariladi.

Demak, Dember effekti elektr maydoni kuchlanganligi uchun ancha aniq yaqinlashishda quyidagi ifoda o'rinli bo'ladi:

$$E = -\frac{e}{\sigma} (D_n - D_p) \frac{d\Delta p}{dx}$$

4.47. Avvalgi masala yechimidan quyidagini yozish mumkin (2-rasmga qarang):

$$E = -\frac{e(D_n - D_p)}{\sigma_0} \frac{d\Delta p}{dx}, \quad \frac{d\varphi}{dx} = \frac{e D_n (1 - b^{-1})}{e \mu_n (n_0 + b^{-1} p_0)} \frac{d\Delta p}{dx}$$

Shu sababli qalin namuna uchun

$$\Delta p = \Delta \varphi_1 e^{-x/L}, \quad \Delta \varphi_1 = \Delta \varphi_{1, x=0}, \quad \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{kT(b-1)}{e(bn_0 + p_0)} \Delta p.$$

Yoritilgan yuza uchun chegaraviy shart quyidagicha bo'ladi:

$$g_s = s \Delta p|_{x=0} - D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0}$$

Bundan

$$\Delta p_1 = \frac{g_s}{D_p + s} = \frac{g_s}{bl_p + s} = \frac{g_s}{\sqrt{b\tau} + s} \quad (1)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{kT(b-1)}{ebn_0} \frac{g_s}{\sqrt{\frac{D_n}{b\tau_p} + s}} \quad (2)$$

Berilgan kattaliklarni (1) formulaga qo'yib, $\Delta p_1 = 6,0 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}$ natijani olamiz.

Shunday qilib, $\Delta p_1 \ll n_0$ shart bajariladi va (2) formulaga asosan

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

4.48. Oldingi masala yechimidan ma'lumki, uzluksizlik tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi (2-rasmga qarang):

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} + g_0 - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0,$$

$g_0 = Ia$ - namuna hajmida ortiqcha zaryad tashuvchilarning generatsiya tezligi.

$$D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0} = s\Delta p|_{x=0}, \quad D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=d} = -s\Delta p|_{x=d}, \quad \Delta p \rightarrow 0 \text{ agar } x \rightarrow \infty - \text{ chegaraviy}$$

shartlar o'rinli bo'ladi.

Shuning uchun qalin namuna holda $\Delta p(x) = g_0 \tau_0 + C_1 e^{-x/L_p} + C_2 e^{x/L_p}$

Nurlantirilayotgan sirtlar uchun chegaraviy shartlar quyidagicha:

$$C_1 = s g_0 \tau_p \frac{\left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) e^{\frac{d}{L_p}} + \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right)}{- \left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) e^{\frac{d}{L_p}} + \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right) e^{-\frac{d}{L_p}}}, \quad (2)$$

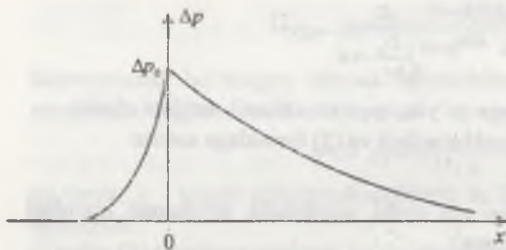
$$C_2 = s g_0 \tau_p \frac{\left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) + \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right) e^{-\frac{d}{L_p}}}{- \left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) e^{\frac{d}{L_p}} + \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right) e^{-\frac{d}{L_p}}}. \quad (3)$$

(1), (2) va (3) formulalarni qo'llab, quyidagini topamiz:

$$\Delta p(0) = \Delta p(d) = g_0 \tau_p \frac{D_p \left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) e^{\frac{d}{L_p}} - \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right) e^{-\frac{d}{L_p}} - 2s}{\left(\frac{D_p}{L_p} + s \right) e^{\frac{d}{L_p}} - \left(\frac{D_p}{L_p} - s \right) e^{-\frac{d}{L_p}}}$$

Bizni g hol uchun hisoblashlar quyidagi natijani beradi: $\Delta p(0) = 9,8 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$.

4.49. Uzluksizlik tenglamasi berilgan hol uchun quyidagi ko'rinishga keladi:



18-rasm

$$\Delta p = \begin{cases} \Delta p_0 e^{k_1 x}, & x < 0 \\ \Delta p_0 e^{k_2 x}, & x > 0 \end{cases} \quad \text{bu yerda: } k_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{eE}{kT} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \frac{e^2 E^2}{k^2 T^2} + \frac{1}{L_p^2}}, \quad \text{bunda } \Delta p_n = \Delta p_0 \quad x=0$$

injeksiya nuqtasidagi Δp ning qiymati.

$l = kT/eE$, $L_E = E\mu_p\tau_p$ (L_E - dreyf uzunlik) belgilashlar kiritsak, k ning ifodasi oson aniqlanadi:

$$k_{1,2} = \frac{1}{2l} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4l}{L_E}} \right)$$

Bizning sharoitda $l = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ sm}$, $L_E = \frac{eEL_p^2}{kT} = 1,57 \text{ sm}$.

$l/L_E \ll 1$ bo'lgani uchun, $k_1 \approx \frac{1}{l}$; $k_2 \approx -\frac{1}{L_E}$ deb hisoblash mumkin.

4.50. Dreyflarini (daydishlarini) hisobga olmaganda nomuvozanatli kovaklar iaqsimoti quyidagicha bo'ladi: $\Delta p = \Delta p(0)e^{-x/L_p}$. Bu yerdan

$$j_r(x) = -eD_p \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{eD_p \Delta p(0)}{L_p}, \quad j_p(0) = \gamma j \quad \text{formulani qo'llab, quyidagini topamiz:}$$

$$\Delta p(0) = \frac{L_p}{eD_p} = 10^{13} \text{ sm}^{-3}$$

4.51. Tutilishlar bo'lmaganda ($\Delta n = \Delta p$) va kovakli tokning dreyf tashkil etuvchisini hisobga olmaganda

$$j_p = -eD_p \frac{d\Delta p}{dx} = \gamma j e^{-x/L_p}, \quad j_n = \sigma_n E + eD_n \frac{d\Delta n}{dx} = \sigma_0 E - b j_p, \quad \sigma_0 = en_0 \mu_n$$

ga ega bo'lamiz. To'liq tok zichligi quyidagiga teng:

$$j = j_n + j_p = \sigma_0 E - (b-1) \gamma j e^{-x/L_p}$$

Bu yerdan $x=0$ dagi kuchlanganlikni topamiz:

$$E(0) = \frac{j}{\sigma_0} [1 + (b-1)\gamma] = 0,025 \text{ V / sm}$$

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - E\mu_p \frac{d\Delta p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau} = 0,$$

$x \neq 0$ yoki

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{eE}{kT} \frac{d\Delta p}{dx} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0, \quad x \neq 0$$

Injeksiya nuqtasidan katta masofalarda muvozanatsiz konsentratsiya Δp nolga aylanadi. Tenglamani esa quyidagi yechim qanoatlan-tiradi (18-rasm):

Agar $E\mu_p \ll D_p/L_p$ yoki $E \ll kT/eL_p$ bo'lsa, kovaklar o'tkuzuvchanlik tok diffuzion tokdan ancha kichik bo'ladi. Bizning sharoitda ushbu tengsizlik bajariladi.

4.52. Ushbu holda uzluksizlik tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{(\Delta p)^2}{a} = 0.$$

Uni $2 \frac{d\Delta p}{dx}$ ga ko'paytirib quyidagini olamiz: $D_p \frac{d}{dx} \left(\frac{d\Delta p}{dx} \right)^2 - \frac{2}{3a} \frac{d}{dx} (\Delta p)^3 = 0$.

undan $\left(\frac{d\Delta p}{dx} \right)^2 - \frac{2}{3aD_p} (\Delta p)^3 = \text{const}$. Bu yerda $x \rightarrow \infty$ da $\Delta p \rightarrow 0$ va $\frac{d\Delta p}{dx} \rightarrow 0$.

ko'lgani uchun $\text{const} = 0$. $x=0$ nuqtadan uzoqlashgandagi ortiqcha kovaklar konsentratsiyasini kar ayishini hisobga olib, (1) ifodadan

$$\Delta p(x) = \frac{\Delta p(0)}{\left(1 + \frac{x}{x_0}\right)^2} \text{ ni topamiz. Bu yerdan } x_0 = \left[\frac{6aD_p}{\Delta p(0)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

4.53. Uzluksizlik tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$D \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - E\mu \frac{d\Delta p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0, \text{ bu yerda } D = \frac{n_0 + p_0}{D_p + D_n}, \mu = \frac{n_0 + p_0}{\mu_p + \mu_n}$$

$\gg 0$ va kuchli elektr maydon uchun tenglama yechimi quyidagicha (49)

masalaga qarang): $\Delta p(x) = \Delta p(0)e^{-\frac{x}{L_E}}$, bu yerda $L_E = E\mu_p \tau_p$.

$x=0$ nuqtada kovaklar toki uchun quyidagi ifodani yozamiz:

$$j_p \Big|_{x=0} = j_p = [e\mu_p (p_0 + \Delta p)E]_{x=0} + \frac{eD_p}{L_E} \Delta p(0),$$

yoki dreyfga nisbatan diffuziyani hisobga olmasak,

$$j_p \Big|_{x=0} = j_p = e\mu_0 (p_0 + \Delta p)E \Big|_{x=0} \quad (1)$$

To'liq tok zichligi quyidagicha: $j = j_n + j_p = e\mu_n (n_0 + \Delta n)E + e\mu_p (p_0 + \Delta p)E$ Bundan

$$L_{1=0}^{\downarrow} = \frac{j}{e\mu_p [bn_0 + p_0 + (b+1)\Delta p(0)]} \quad (2)$$

(2) ni (1) ga qo'yib, j ni topamiz

$$j = j \frac{p_0 + \Delta p(0)}{bn_0 + p_0 + (b+1)\Delta p(0)} \approx j \frac{n_0}{bn_0 + p_0} \frac{\Delta p(0)}{p_0} \text{ va } j = \frac{p_0}{bn_0 + p_0} + \frac{p(0)}{bn_0 + p_0}, \text{ bu yerda}$$

$\Delta p(0) = \gamma(bn_0 + p_0) - p_0$ (3) Bizning holda $\Delta p(0) = -0,11 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}$. $\Delta p(0)$

$\gamma = \gamma_0 = \frac{P_0}{Bn_0 + P_0}$ bo'lsa, u holda (3) dan kelib chiqadiki, $\Delta p(0) = 0$, bunda

kontakt omik kontakt deyiladi. Agar kuchsiz legirlangan elektron yarimo'tkazgichda $\gamma \ll \gamma_0 = \frac{P_0}{en_0 + P_0}$ shart bajarilsa, u holda kontakt sohasida asosiy zaryad tashuvchilarning kamayishi kuzatiladi. Ushbu hodisa tok tashuvchilar «eksklyuziyasi» deb nom olgan.

4.54. Boshlanqich tenglama oldingi masaladagi kabi, biroq $\Delta p(x)$ taqsimoti (4.49- masalaga qarang) boshqacha. $\Delta p = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{eE_0 x}{kT}\right)$, $x=0$ nuqtada

kovaklar toki quyidagicha $j_x(0) = j = -e[p_0 + \Delta p(0)]\mu_p |E| - eD_p \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0}$, yoki (1) ni

hisobga olib $j_p(0) = j = -ep_0\mu_p |E|$, $x=0$ nuqtada elektron tok quyidagiga teng:

$$j_n(0) = -e[n_0 + \Delta p(0)]\mu_n |E| - \frac{eD_n}{kT} \Delta p(0)k|E| = -e[n_0 + 2\Delta p(0)]b\mu_p |E|.$$

(2) va (3) ni qo'shamiz:

$$\gamma = \frac{j_p(0)}{j} = \frac{p_0}{bn_0 + p_0 + 2b\Delta p(0)}. \text{ Bu yerdan } \Delta p(0) = \frac{(1-\gamma)p_0 - \gamma bn_0}{2b\gamma}.$$

$$\text{Agar } \gamma \ll 1 \text{ bo'lsa, u holda } \Delta p(0) = \frac{p_0 - \gamma bn_0}{2b\gamma}.$$

Bizning holda $\Delta p(0) = 2,9 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$. (6) $x=0$ nuqtada kuchli manfiy elektr maydon (ya'ni maydon yo'nalishi shundayki, kovaklar $x=0$ nuqtadan elektrodga harakat qiladi) qo'yilgan. Kuchsiz legirlangan elektron yarimo'tkazgichda injeksiya koeffitsiyenti γ ning kichik qiymatlarida elektrod yaqinida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar - kovaklar yig'ilib qoladi.

4.55. Uzluksizlik tenglamasi $D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau} = 0$. (1) ning yechimi quyidagi

ko'rinishga ega: $\Delta p = \Delta p(0) e^{-x/L_p}$, (2) ko'rinishda bo'lgani uchun quyidagilarni

$$\text{topamiz: } \Delta p_1 = \Delta p(0) e^{-x_1/L_p}, \quad \Delta p_2 = \Delta p(0) e^{-x_2/L_p}, \quad (3)$$

$$\text{undan } \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = e^{\frac{x_2 - x_1}{L_p}}, \quad L_p = \frac{x_2 - x_1}{\ln(\Delta p_1 / \Delta p_2)} = 0,1 \text{ sm}. \quad (4)$$

4.56. V_H kuchlanish va E_y maydon $j_y=0$ shartdan topiladi. (4.1) tenglamada H^2 ni

$$j_x = en_0 \mu_n E_x,$$

$$\text{hadlarni hisobga olmasak, } j_y = 0 = en_0 \mu_n \left(E_y + \frac{\mu_n H}{c} E_x H \right). \quad (5)$$

$$\text{Bu yerdan } E_y \text{ va } V_H \text{ topiladi: } E_y = -\frac{\mu_{nH} H}{c} E_x = \frac{\mu_n H}{c} \frac{j_x}{en_0 \mu_n} \quad (6)$$

$$\text{va } R = R_0 = -\frac{\mu_n}{\mu_n n_0 e} = 7,38 \cdot 10^3 \text{ sm}^3 / C, \quad V_H = -\frac{\mu_n a_j H}{\mu_n n_0 e c} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ V}. \quad (7)$$

hosil bo'ldi.

4.57. (4.2) tenglamadan $\beta = \frac{\mu_{pH}}{c}$ kelib chiqadi. Unda H^3 li hadlarni hisoblay olmay quyidagini olamiz: $E_y = \beta E_x$, $j_{px} = \rho e \mu_p E_x [1 - \beta^2 (\eta_p - 1)]$ (8)

U yerdan $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ni nisbiy o'zgarishining kichikligidan

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = (\eta_p - 1) \beta^2, \quad \beta^2 = \left(\frac{\mu_{pH}}{c} \right)^2 = 8 \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

va $\eta_p = 1,3$. (4.3) formula bo'yicha $R_0 = \frac{c\beta}{\sigma_0 H}$. Shuning uchun $R_0^2 \sigma_0^2 \frac{H^2}{c^2} = \beta^4$

va (4.5) ta'rifga asosan $\xi_p = \eta_p - 1 = 0,3$. (10)

Ushbu qiymat akustik tebranishlarda kovaklar soq qilishi uchun xarakterlidir.

4.58. (4.1) va (4.2) tenglamalar yiqindisining y komponentasini olamiz:

$$0 = j_{ny} + j_{py} = e(n\mu_n + p\mu_p)E_y + (n\mu_n\mu_{nH} - p\mu_p\mu_{pH}) \frac{E_x H}{c} \quad (11)$$

U yerdan $E_y = \frac{p - nb^2}{p - nb} \frac{\mu_{pH}}{c} E_x$. (12)

(4.3) formula bo'yicha

$$R = \frac{cE_y}{\sigma_0 E_x H} = \frac{cE_y}{H(ne\mu_n + pe\mu_p)E_x} = \frac{cE_y}{HE_x e\mu_p (p + nb)} = \frac{p - nb^2}{(p - nb)^2} \frac{\mu_{pH}}{\mu_p} \frac{1}{e} \quad (13)$$

p va n ni neytrallik shartidan aniqlaymiz:

$$p = n + N_a = \frac{n^2}{p} + N_a \quad (14)$$

U yerdan $p = \frac{N_a}{2} + \sqrt{\frac{N_a^2}{4} + n^2} = 5,47 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$. (15)

Echinning ishorasi $p > 0$ shartga javob beradi hamda

$$n = 0,47 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3} \quad (16)$$

va nihoyat quyidagini topamiz:

$$R = -1190 \text{ sm}^3 / C \quad (17)$$

4.59. $R=0$ da E_y nolga aylanadi. Shuning uchun (4.6) va (4.7) formulalardan

quyidagini topamiz: $0 = j_{nx} + j_{px} = \frac{nb\mu_p}{1 + b^2\beta^2} b\beta E_x - \frac{pe\mu_p}{1 + b^2\beta^2} \beta E_x$, $\frac{nb^2}{1 + b^2\beta^2} = \frac{p}{1 + b^2\beta^2}$,

$$\frac{p}{n} = \frac{b^2(1 + \beta^2)}{1 + b^2\beta^2} = 25,3. \quad (18)$$

Kichik β larda $j_y=0$ shartdan kelib chiqadiki

$$\frac{R_0 \sigma_0 H}{c} = \frac{E_y}{E_x} = \frac{p - nb^2}{p + nb} \beta \quad (19)$$

(4.6) va (4.7) ifodalar yig'indisining x komponentasini qarab chiqib quyidagini olamiz:

$$j_x = ne\mu_n E_x \left(1 - b^2 \beta^2 - \frac{p - nb^2}{p + nb} \beta^2 b \right) + pe\mu_p E_x \left(1 - \beta^2 + \beta^2 \frac{p - nb^2}{p + nb} \right) \quad (20)$$

$$\text{Bundan } \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = -\frac{pn\beta^2(1+b)^2 b}{(p+nb)^2}, \quad \xi = -\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \left(\frac{c}{R_0\sigma_0 H} \right)^2 = \frac{npb(1+b)^2}{(p-nb^2)^2} = \frac{\frac{p}{n} b(1+b)^2}{\left(\frac{p}{n} - b^2 \right)^2} = 0,95.$$

(21)

4.60. (4.12) tenglamani x bo'yicha $x=0$ dan $x=d$ gacha integrallab (5-rasmga qarag), quyidagini olamiz: $0 = \sigma_0 dE_x + \frac{eH(\mu_{nH} + \mu_{pH})}{c} D_p \Delta n(0)$ (22)

Namuna kub bo'lgani uchun $dE_y = V_{FEM}$ va

$$V_{FEM} = -\rho_0 e \beta (1+b) D_p \Delta n(0) = 2,5 \cdot 10^{-4} V. \quad (23)$$

4.61. Ushbu holda FEM-kuchlanish fotoo'tkazuvchanlik hisobiga kuchlanish tushishi o'zgarishi bilan kompensatsiyalanadi. (4.12) tenglamani integrallab va quyidagi tartibdagi hadlarni olib qolib

$$\Delta n = \Delta p = \Delta n(0) \exp(-x/L_n) \quad (24)$$

quyidagini olamiz:

$$0 = eE_{iy} (\mu_n + \mu_p) \Delta n(0) L_n + \frac{eH}{c} (\mu_{nH} + \mu_{pH}) D_n \Delta n(0) \quad (25)$$

Bundan

$$\tau = \left(\frac{H \mu_{nH} + \mu_{pH}}{c \mu_n + \mu_p} \frac{1}{E_{iy}} \right)^2 D_n = 5 \cdot 10^{-7} s. \quad (26)$$

4.62. (4.8)-(4.12) Tenglamalardan kelib chiqadiki, n -turdagi yetarlicha qalin namuna uchun

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) e^{-x/L_n}, \quad \Delta p(x) = \frac{\tau_p}{\tau_n} \Delta n(x), \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Bu yerda, muvozanatdan chetlashish kichik bo'lgani uchun

$$\delta = \frac{1}{d\sigma_0} \int \Delta\sigma(x) dx = \frac{\Delta n(0) L_p}{n_0 d} \left(1 + \frac{\tau_p}{b\tau_n} \right)$$

(4.12) tenglamani bizning hol uchun quyidagicha yozsa bo'ladi:

$$j_x = \frac{V_{FEM}}{a} \sigma_0 + e\beta(1+b) D_n \frac{\tau_p}{\tau_n} \frac{d\Delta n}{dx}$$

y yo'nalish bo'yicha to'liq tok nolga teng, shuning uchun integrallab

$$V_{FEM} = \frac{c(1+b) D_p \Delta n(0) \tau_p}{d \mu_n n_0 \tau_n}, \quad \frac{\tau_p}{\tau_n} = 10.$$

ni topamiz. Bu natijani (1) ga qo'yib, quyidagini topamiz:

$$\tau_p = \frac{i}{D_p} \left[\frac{\delta \cdot d}{i + \frac{\tau_p}{b\tau_n}} \frac{n_0}{\Delta n(0)} \right] = 10^{-9} \text{ s}, \quad \tau_n = 10^{-6} \text{ s}.$$

4.63. Faqat x ga bog'liq uchun Puasson tenglamasi

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon}, \quad \rho = e[p(x) - n(x)], \quad (1)$$

Bu yerda

$$p(x) = n_i e^{-e\varphi(x)/kT}, \quad n = n_i e^{e\varphi(x)/kT}. \quad (2)$$

Bu yerda n , -hajmiy zaryad sohadagi hajmda elektronlar (yoki kovaklar)

konsentratsiyasi. (2) ni Puasson tenglamasi (1) ga qo'yamiz:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\epsilon} n_i (n_i e^{e\varphi/kT} - n_i e^{-e\varphi/kT}) = \frac{8\pi^2 n_i}{\epsilon kT} \varphi.$$

$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{8\pi e^2 n_i}}$ bo'lgani uchun, quyidagini hosil hilamiz:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} - \frac{\varphi}{L_D^2} = 0. \quad (3)$$

Potensial konstanta aniqligicha aniqlanganligi uchun, biz uni namuna ichida nolga teng deb o'lishimiz mumkin. Elektr induksiya vektorining normal tashkil etuvchisi uzluksiz bo'lishi kerak. Shuning uchun chegaraviy shartlar quyidagi ko'rinish oladi (6-rasmga qarang):

$$\begin{cases} \varphi = 0, & x \rightarrow \infty, \\ E = -x \frac{d\varphi}{dx}, & x = 0. \end{cases}$$

(3) tenglama yechimi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\varphi(x) = C_1 e^{-x/L_D} + C_2 e^{x/L_D}.$$

Chegaraviy shartlarda ushbuni topamiz:

$$C_2 = 0, \quad C_1 = \frac{EL_D}{\epsilon}, \quad (4)$$

$$\varphi(x) = \frac{EL_D}{\epsilon} e^{-x/L_D}$$

(5.1) va (4) ga asoslanib,

$$\begin{cases} E_x = -\frac{eL_D E}{\epsilon} e^{-x/L_D}, \\ E_x = E_{x0} - \frac{eL_D E}{\epsilon} e^{-x/L_D}. \end{cases}$$

ni topamiz. Sirdagi potensialni sakrashi

$$\Delta\varphi = \frac{EL_D}{\epsilon} = 0,76 \text{ mV}.$$

4.64. Oldingi masaladagi kabi quyidagi tenglamani olamiz:

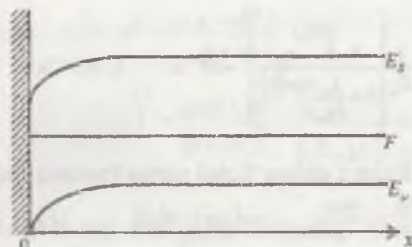
$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \frac{\varphi}{L_D^2} = 0,$$

Bu yerda

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{8\pi e^2 n_i}}$$

Chegaraviy shartlar (19-rasm) quyidagicha

$$\begin{cases} \varphi = 0, & x \rightarrow \infty, \\ E = \frac{4\pi Q_s}{\epsilon}, & Q_s = eN, \\ & x = 0. \end{cases}$$



19-rasm

Tenglama yechimi quyidagi ko'rinishda izlanadi:

$$\varphi(x) = C_1 e^{-x/L_D} + C_2 e^{x/L_D}.$$

Chegaraviy shartlardan quyidagini topamiz:

$$C_2 = 0, \quad C_1 = -\frac{4\pi e N L_D}{\epsilon}.$$

Nihoyat quyidagi natijalarni olamiz:

$$\varphi = \frac{4\pi e N}{\epsilon} e^{-x/L_D}, \quad \Delta\varphi = \frac{4\pi e N L_D}{\epsilon} = 8,6 \text{ mV}.$$

4.65. Chegaraviy shartlardan

$$E = \frac{4\pi e N}{\epsilon}.$$

φ_0 ni namunaning elektroneytrallik shartidan topamiz:

$$N = \int_0^{\infty} [n(x) - p(x)] dx,$$

$$\text{bu erda } n(x) = n_i e^{e\varphi/kT}, \quad p(x) = n_i e^{-e\varphi/kT}$$

Shunday qilib,

$$N = 2n_i \int_0^{\varphi_0/e} \text{sh} \left[\frac{e(\varphi_0 - E \cdot x)}{kT} \right] dx$$

$\frac{e(\varphi_0 - E \cdot x)}{kT} = y$ deb belgilab, quyidagini hosil qilamiz:

$$N = -\frac{2n_i kT}{eE} \int_{e\varphi_0/kT}^0 \text{sh} y dy = -\frac{2n_i kT}{eE} \text{ch} y \Big|_{e\varphi_0/kT}^0 = \frac{n_i kT}{eE} (e^{e\varphi_0/kT} - 2 + e^{-e\varphi_0/kT})$$

$e\varphi_0/kT \gg 1$, deb olib $e^{e\varphi_0/kT} \approx \frac{4\pi e^2 N^2}{\epsilon kT n_i}$ ni, undan esa

$$e\varphi_0 = kT \ln \frac{4\pi e^2 N^2}{\epsilon kT n_i} = 0,32 \text{ eV} \quad \text{ni olamiz.}$$

4.66. Chiqish ishining o'zgarishi sirdagi sohaning egilish kattaligiga teng (il-rasmga qarang) $\Delta\Phi = -e\varphi$. Qaralayotgan holda $\varphi = 4\pi m$, bu yerda m - ikkilangan qatlam quvvati ($m = Nd$, $d = el$, l - molekula dipoli yelkasi), ya'ni $\varphi = 4\pi Nd$.

Bundan $\Delta\Phi = -4\pi eNd = -3,78 \cdot 10^{-3} eV$

4.67. Puasson tenglamasidan foydalanamiz:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi\varphi}{e}, \quad \rho = e[N_D - N_a + p(x) - n(x)]$$

Chegaraviy shartlar quyidagicha:

$$\begin{cases} \varphi|_{x \rightarrow \infty} = 0, & \frac{d\varphi}{dx}|_{x \rightarrow \infty} = 0, \\ \varphi|_{x=0} = \varphi_0 > 0. \end{cases}$$

Yarimo'tkazgich hajmida $N_D - N_a = n - p$.

Ibu yerda n va p - hajmdagi elektronlar va kovaklar konsentratsyasi

Ibu yerdan $n(x) = ne^{e\varphi/kT}$, $p(x) = pe^{-e\varphi/kT}$ va $\rho = en(1 - e^{e\varphi/kT}) + ep(e^{-e\varphi/kT} - 1)$,

$np = n_i^2$, ya'ni $\frac{n_i}{n_s} = \frac{n_i}{p} = \gamma$ ekanligidan $\rho = en_i[\gamma(1 - e^{e\varphi/kT}) + \gamma^{-1}(e^{-e\varphi/kT} - 1)]$

$\psi = e\varphi/kT$ belgilash kiritamiz, u holda Puasson tenglamasi quyidagi ko'rinish oladi:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{4\pi e^2 n_i}{ekT} [\gamma(1 - e^\psi) + \gamma^{-1}(e^{-\psi} - 1)]$$

Ikkala qismini $2 \frac{d\psi}{dx}$ ga ko'paytiramiz va ψ bo'yicha integrallaymiz

$$\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 = -\frac{1}{L_D^2} (\gamma\psi - \gamma e^\psi - \gamma^{-1}e^{-\psi} - \gamma^{-1}\psi) + C.$$

Ibu yerda $\frac{1}{L_D^2} = \frac{8\pi e^2 n_i}{ekT}$, L_D - Debay uzunligi. C-doimiyini chegaraviy shartdan olamiz: $x \rightarrow \infty$ da $\psi \rightarrow 0$ va $d\psi/dx \rightarrow 0$. Doimiy uchun quyidagini olamiz:

$$C = -\frac{1}{L_D^2} (\gamma + \gamma^{-1})$$

va

$$\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 = \frac{1}{L_D^2} [\gamma(e^\psi - 1) + \gamma^{-1}(e^{-\psi} - 1) + \psi(\gamma^{-1} - \gamma)].$$

Undan $\frac{d\psi}{dx} = \pm \frac{kT}{e} \frac{1}{L_D} \sqrt{\gamma(e^{e\varphi/kT} - 1) + \gamma^{-1}(e^{-e\varphi/kT} - 1) + \frac{e\varphi}{kT}(\gamma^{-1} - \gamma)}$.

Plus ishorani tashlab yuberish darkor, chunki $\frac{d\varphi}{dx} < 0$ yani x ortishi bilan potensial kamayib boradi. $x=0$ da chegaraviy shart quyidagi ko'rinish oladi:

$$e\mathcal{E}|_{x=0} = 4\pi Q_s$$

Bu yerda $E|_{x=0} = -\frac{d\varphi}{dx}|_{x=0}$, Q , sirtidagi zaryad zichligi. Bu yerdan

$$E|_{x=0} = \frac{kT}{eL_D} \sqrt{\gamma(e^{e\varphi/kT} - 1) + \gamma^{-1}(e^{-e\varphi/kT} - 1) + \frac{e\varphi_s}{kT}(\gamma^{-1} - \gamma)}$$

$$Q_s = 2en_s L_D \sqrt{\gamma(e^{e\varphi/kT} - 1) + \gamma^{-1}(e^{-e\varphi/kT} - 1) + \frac{e\varphi_s}{kT}(\gamma^{-1} - \gamma)}$$

4.68. (4.67) masaladan

$$Q_s = 2en_s L_D \sqrt{\gamma(e^{e\varphi/kT} - 1) + \gamma^{-1}(e^{-e\varphi/kT} - 1) + \frac{e\varphi_s}{kT}(\gamma^{-1} - \gamma)}$$

$$\frac{1}{L_D^2} = \frac{8\pi e^2 n_s}{\epsilon kT}, \quad \gamma = \frac{n_s}{n_i}$$

Masala sharti bo'yicha $n/n_i \gg 1$ va $e\varphi_s/kT \gg 1$ va u holda

$$Q_s \approx 2en_s L_D \sqrt{\gamma e^{e\varphi/kT}} = \left(\frac{ekTn_s}{2\pi}\right)^{1/2} e^{e\varphi_s/2kT} \quad Q_s = eN \quad \text{bo'lgani uchun}$$

$$\frac{e\varphi_s}{2kT} = \ln \left[eN \left(\frac{2\pi}{\epsilon kTn_s} \right)^{1/2} \right] = 5,14. \quad \text{Bundan } e\varphi_s = 0,27 \text{ eV}$$

4.69. Agar sohalar pastga egilgan bo'lsa, $\varphi > 0$ va $\varphi < 0$ bo'ladi, agar sohalar yuqoriga egilgan bo'lsa. Shuning uchun (4.67*) masala yechimida $\varphi_s \rightarrow -\varphi_s$ ga almashtirish kerak bo'ladi:

$$Q_s = 2en_s L_D \sqrt{\gamma(e^{-e\varphi/kT} - 1) + \gamma^{-1}(e^{e\varphi/kT} - 1) + \frac{e\varphi_s}{kT}(\gamma^{-1} - \gamma)}$$

Bu erda φ_s - zona sohasini egilish kattaligi; $1/L_D^2 = 8\pi e^2 n_s / \epsilon kT$; $\gamma = n_s/n_i \gg 1$ va $e\varphi_s/kT = 10 \gg 1$.

Shuning uchun

$$Q_s \approx 2en_s L_D \sqrt{-\gamma + \gamma^{-1}e^{-e\varphi_s/kT} + \gamma \frac{e\varphi_s}{kT}} \approx 2en_s L_D \gamma^{1/2} \left(\frac{e\varphi_s}{kT} \right)^{1/2} = \left(\frac{\epsilon n_s e \varphi_s}{2\pi} \right)^{1/2} = 3,37 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Bundan } N = \frac{Q_s}{e} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$$

4.70. Qarayotgan holda sirtiy o'tkazuvchanlik quyidagicha ((5.10) ifoda bilan taqqoslaganda):

$$G \approx e\mu_p \int_0^{\varphi} [p(x) - p] dx,$$

$$\text{Bu yerda } p(x) = p e^{\frac{e\varphi}{kT}}, \quad \varphi > 0,$$

$$\text{ya'ni, } G = e\mu_p \int_0^{\varphi} p(e^{e\varphi/kT} - 1) dx = -e\mu_p p \int_0^{\varphi} \frac{e^{e\varphi/kT} - 1}{\frac{d\varphi}{dx}} d\varphi \quad (1)$$

Chegaraviy shartlar quyidagicha

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi|_{x=0} &= \varphi_0, \quad e\varphi_0 = 0,25eV \\ \varphi|_{x=\infty} &= 0. \end{aligned} \right.$$

Puasson tenglamasi quyidagi ko'rinish oladi:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} [p(x) - N_a], \text{ bunda } N_a = p,$$

$$\text{yoki } \frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} p(e^{e\varphi/kT} - 1),$$

$$\text{undan esa } \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^2 = \frac{8\pi e p}{\varepsilon} \int (e^{e\varphi/kT} - 1) d\varphi = \frac{8\pi e p}{\varepsilon} \left(\frac{kT}{e} e^{e\varphi/kT} - \varphi + C \right).$$

$x \rightarrow \infty$ da $\frac{d\varphi}{dx} \rightarrow 0$, $\varphi \rightarrow 0$ bulardan $C = -kT/e$ va

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\sqrt{\frac{8\pi p k T}{\varepsilon} \left(e^{e\varphi/kT} - \frac{e\varphi}{kT} - 1 \right)} \quad (2)$$

(2) formulani (1) ga qo'yib, quyidagini olamiz:

$$G = e\mu^* p \int_0^{\varphi_0} \frac{(e^{e\varphi/kT} - 1) d\varphi}{\sqrt{\frac{8\pi p k T}{\varepsilon} \left(e^{e\varphi/kT} - \frac{e\varphi}{kT} - 1 \right)}}$$

Masala shartiga ko'ra $e\varphi_0/kT = 10 \gg 1$ bo'lgani uchun, integralga asosan φ_0 ga yaqin φ qiymatlar sohasi hissa qo'shadi, natijada quyidagini yozish mumkin:

$$G \approx e\mu^* p \sqrt{\frac{\varepsilon}{8\pi p k T}} \int_0^{\varphi_0} \frac{(e^{e\varphi/kT} - 1) d\varphi}{e^{e\varphi/2kT}}$$

Bu yerdan $G = e\mu^* p \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot 4(kT)^2}{8\pi p k T e^2}} e^{e\varphi_0/2kT} = \sqrt{2} L_D e\mu^* p e^{e\varphi_0/2kT}$, bu yerda $L_D = \sqrt{\frac{ekT}{4\pi e^3 p}}$

Masala shartlarini qo'yib, ushuni topamiz: $G = 4,4 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$

4.71. Sirtiy o'tkazuvchanlik ((5.10) va (5.9) ga qarang) quyidagicha

$$G = e\mu_n \Delta N + e\mu_p \Delta P = e\mu_n \int_0^{\varphi_0} (n_0 e^{e\varphi/kT} - n_0) dx + e\mu_p \int_0^{\varphi_0} (n_0 e^{-e\varphi/kT} - n_0) dx.$$

yoki masala shartiga ko'ra $e\varphi_0/kT \ll 1$ bo'lgani uchun

$$G \approx e\mu_n n_0 \int_0^{\varphi_0} \frac{e\varphi}{kT} dx - e\mu_p n_0 \int_0^{\varphi_0} \frac{e\varphi}{kT} dx = \frac{e^2 \mu_n n_0}{kT} (1 - b^{-1}) \int_0^{\varphi_0} \varphi dx.$$

$\varphi(x)$ bog'lanishni Puasson tenglamasi yechimidan topamiz:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi p}{\varepsilon}, \quad \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi e}{\varepsilon} [p(x) - n(x)] \quad (2)$$

Chegaraviy shartlar quyidagicha

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0, \quad x = 0. \\ \varphi &= 0, \quad x \rightarrow \infty. \end{aligned} \right.$$

(2) ga hajmiy zaryad sohasidagi elektron va kovaklar konsentratsiyalari ifodasini

qo'yamiz va quyidagini topamiz: $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi en}{\epsilon} (e^{-\varphi/kT} - e^{\varphi/kT}) = \frac{8\pi e^2 n}{\epsilon kT} \varphi$

yoki $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\varphi}{L_D^2}$,

Bu yerda $L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{8\pi e^2 n}}$. Tenglamani yechimi quyidagicha: $\varphi = \varphi_s e^{-x/L_D}$,

uni (1) ga qo'yamiz $G = \frac{e^2 \mu_n n L_D \varphi_s (1 - b^{-1})}{kT}$,

undan esa $\varphi_s = G \frac{kT}{e^2 \mu_n n L_D (1 - b^{-1})} = \frac{8\pi G L_D}{e \mu_n (1 - b^{-1})} = 5,4 \text{ mV}$

4.72. $x=0$ nuqtada chegaraviy shartlar, Puasson tenglamasi uchun, quyidagicha

$$4\pi Q_s = \epsilon_1 E_1 - \epsilon_2 E_2 \quad (1)$$

Bunda $E_1 = E$ - tashqi elektr maydon kuchlanganligi, $\epsilon_1 = 1$, $E_2 = -\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=0}$ va

$$\epsilon_2 = \epsilon = 16.$$

Puasson tenglamasi quyidagicha yoziladi: $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi p}{\epsilon}$, $p = e(n - ne^{\varphi/kT})$, bu

yerda $n = N_A$, yoki, $e\varphi_s/kT \ll 1$ bo'lgani uchun

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} \approx \frac{4\pi e^2 n \varphi}{\epsilon kT} = \frac{\varphi}{L_D^2}$$

$\begin{cases} x=0, & \varphi = \varphi_s \\ x \rightarrow \infty, & \varphi \rightarrow 0 \end{cases}$ chegaraviy shartlar bilan ushbu tenglamani integrallab,

quyidagini olamiz va ushuni topamiz: $\varphi = \varphi_s e^{-x/L_D}$.

Bu yerdan $\int_0^{\infty} \varphi dx = \varphi_s L_D$ (2)

Sirtiy o'tkazuvchanlik ifodasi uchun yozamiz:

$$G = e\mu_n \int_0^{\infty} [n(x) - n] dx + e\mu_p \int_0^{\infty} [p(x) - p] dx.$$

Bu yerda ikkinchi hadlarni hisobga olmasa ham bo'ladi, chunki $n \gg p$ va $n(x) \gg p(x)$ (sohalar pastga yechilgan). (2) formulani qo'llab, quyidagini olamiz:

$$G = e\mu_n n \int_0^{\infty} \frac{e\varphi}{kT} dx = e\mu_n n \frac{e\varphi_s}{kT} L_D.$$

Bu yerdan $\varphi_s = \frac{G \cdot kT}{e\mu_n n L_D} = \frac{G L_D 4\pi}{e\mu_n} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

Sirtiy holatlardagi zaryadni (1) chegaraviy shartlardan topamiz:

$$Q_s = eN = \frac{E - \epsilon \frac{\varphi_s}{L_D}}{4\pi}, \text{ bundan } N = 1,1 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

4.73. Umumiy holda namuna neytrallik shartini yozamiz:

$$\int_0^{\infty} \rho(x) dx + Q_S = 0, \quad (1)$$

bu yerda $Q_S = eN$.

Puasson tenglamasi $\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{e} \rho$ uchun chegaraviy shartlar:

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad \varphi|_{x \rightarrow \infty} = 0$$

Sirtiyl potensial φ , va sirtiyl zaryad Q_S orasidagi bog'lanishni topish uchun Puasson tenglamasini 2 marta integrallaymiz, avval x bo'yicha, keyin φ bo'yicha:

$$\int_0^{\infty} \rho dx = -\frac{\varepsilon}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} dx = -\frac{\varepsilon}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{d}{dx} \frac{d\varphi}{dx} dx = \frac{\varepsilon}{4\pi} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \Big|_{x=0}^{\infty}$$

$$\int_{\varphi_0}^0 \rho d\varphi = -\frac{\varepsilon}{4\pi} \int_{\varphi_0}^0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} d\varphi = -\frac{\varepsilon}{8\pi} \int_0^{\infty} \frac{d}{dx} \frac{d\varphi}{dx} dx = \frac{\varepsilon}{8\pi} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \Big|_{x=0}^{\infty}$$

Ushbu bog'lanishlardan

$$\int_0^{\infty} \rho(x) dx = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\pi}} \int_{\varphi_0}^0 \rho d\varphi. \quad (2)$$

(2) ni (1) ga qo'yamiz

$$\frac{2\pi Q_S^2}{\varepsilon} = \int_{\varphi_0}^0 \rho d\varphi$$

hajmiyl zaryad quyidagiga teng: $\rho = e[N_D^* - n(x)]$.

Bu yerda

$$N_D^* = \frac{n}{1 + e^{\frac{F - E_D + e\varphi}{kT}}}$$

E_D deganda, umuman aytganda, $E_D + kT \ln g_D$ bo'lishi kerak, bunda g_D -donor sathining aynish karrasi, E_D -donor energiyasi. Hajmda ($x \gg L$) bo'lganligi

uchun $N_D^* = \frac{n}{1 + e^{\frac{E_D - F}{kT}}} \approx n$, $\left(\frac{E_D - F}{kT} \gg 1 \right)$.

Hajmiyl zaryad sohasida

$$n(x) = ne^{e\varphi/kT}$$

$\int_{\varphi_0}^0 \rho d\varphi$ integralni hisoblab, ushbuni topamiz:

$$\int_{\varphi_0}^0 \rho d\varphi = kTn \left(\ln \frac{1 + e^{\frac{F - E_D + e\varphi_0}{kT}}}{1 + e^{\frac{F - E_D}{kT}}} - 1 + e^{e\varphi_0/kT} \right)$$

Ifodaning shaklini o'zgartiramiz

$$\ln \frac{1+e^{-\frac{F-E_D+\varphi_S}{kT}}}{1+e^{-\frac{F-E_D}{kT}}} = \ln \frac{e^{-\frac{F-E_D}{kT}} + e^{-\frac{F-E_D+\varphi_S}{kT}} + 1 - 1}{1+e^{-\frac{F-E_D}{kT}}} = \ln \left\{ 1 + \frac{e^{-\frac{F-E_D+\varphi_S}{kT}} - 1}{1+e^{-\frac{F-E_D}{kT}}} \right\} = \ln \left\{ 1 + e^{-\frac{\varphi_S}{kT}} - 1 \right\} = -\frac{e\varphi_S}{kT}$$

Shunday qilib,

$$\int_n^b \rho(x) dx = kTn \left(-\frac{e\varphi_S}{kT} - 1 + e^{e\varphi_S/kT} \right)$$

Olingan natijani (3) ifodaga qo'yamiz:

$$\frac{2\pi Q_S^2}{\epsilon} = kTn \left(-\frac{e\varphi_S}{kT} - 1 + e^{e\varphi_S/kT} \right)$$

Ikki xil holni qarab chiqamiz. Birinchi holda

$$\frac{e\varphi_S}{kT} \ll 1.$$

(4) ifodadan quyidagini topamiz

$$\frac{2\pi Q_S^2}{\epsilon} \approx kTn \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{e\varphi_S}{kT} \right)^2,$$

undan

$$\varphi_S = \sqrt{\frac{4\pi N^2 kT}{\epsilon n}} = 3,1 \text{ mV}$$

Ikkinchi holda

$$\frac{e\varphi_S}{kT} \gg 1.$$

(4) formula bu holda quyidagi ko'rinish oladi:

$$\frac{2\pi Q_S^2}{\epsilon} \approx kTn e^{e\varphi_S/kT},$$

bu yerdan

$$\varphi_S = \frac{kT}{e} \ln \frac{2\pi e^2 N^2}{\epsilon kTn} = 0,29 \text{ V}$$

4.74. Hajmiy zaryad zichligi ρ quyidagiga teng

$$\rho = e[p(x) - N_a^-]$$

Bu yerda

$$p(x) = pe^{e\varphi/kT}, \quad N_a^- = \frac{P}{1 + e^{-\frac{E_a - E_0}{kT}}}, \quad E_a = E_0^* + kT \ln g_a, \quad E_0^* - \text{akseptorlar energiyasi, } g_a -$$

akseptor sathlarning aynish darajasi.

Yarimo'tkazgich ichida ($x \gg L_D$) akseptorlar to'la ionlashgan, shuning uchun

$$N_s^- = \frac{P}{1 + e^{\frac{F - E_s}{kT}}} = p$$

$\int \rho d\varphi$ integralni hisoblab, oldingi masala kabi

$$\int \rho d\varphi = pkT \left(1 - e^{-e\varphi_s/kT} + \frac{e\varphi_s}{kT} \right)$$

ni hosil hilamiz. Ushbu natijani quyidagi tenglamaga qo'yamiz.

$$\frac{2\pi Q_s^2}{\epsilon} = - \int \rho d\varphi,$$

(oldingi masalaga qarag) va quyidagini olamiz:

$$Q_s = \sqrt{\frac{pkT\epsilon \left(e^{-e\varphi_s/kT} - \frac{e\varphi_s}{kT} - 1 \right)}{2\pi}}$$

Masala shartig ko'ra $\varphi_s = 0.25V$, demak $T = 300K$ da $\frac{e\varphi_s}{kT} \approx 10^0 \gg 1$. Shuning uchun oxirgi formulada taxminan

$$Q_s = \sqrt{\frac{pkT\epsilon}{2\pi}} e^{-e\varphi_s/2kT}, \text{ bunda } Q_s = eN \text{ va nihoyat,}$$

$$N = \sqrt{\frac{pkT\epsilon}{2\pi e^2}} e^{-e\varphi_s/2kT} = \sqrt{2} p L_D e^{-e\varphi_s/2kT} = 1,52 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}.$$

4.75. Namunani bir tekis yoritib, hosil qilingan generatsiya manbai o'chirilgandan keyingi ortiqcha zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi vaqt bo'yicha qanday o'zgarishini hisoblaymiz:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \operatorname{div} \vec{j}_p, \quad \vec{j}_p = -D_p \operatorname{grad} \Delta p. \quad (1)$$

Chegaraviy shartlar quyidagicha:

$$D_p \frac{d\Delta p}{dx} = \mp s \Delta p \quad x = \pm a \text{ bo'lganda} \quad (2)$$

(x o'qi plastinka sirtiga perpendikulyar yo'nalgan). (1) dan kelib chiqadiki,

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (3)$$

(3) tenglamani o'zgaruvchilarni ajratish usuli bilan yechamiz:

$$\Delta p = \psi(t) \varphi(x) \quad (4)$$

U holda quyidagi tenglamaga ega bo'lamiz:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \varphi = D_p \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \varphi - \frac{\psi \varphi}{\tau_p}.$$

Undan

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \cdot \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{\tau_p} = D_p \frac{d^2 \psi}{dx^2} \cdot \frac{1}{\psi} = \text{const}$$

Ushbu qiymatni $\frac{1}{\tau_s}$ deb belgilaymiz va quyidagicha belgilash kiritamiz:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_s}$$

Vaqtga bog'liq tenglama bu holda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{\tau} = 0$$

Uning xususiy yechimi

$$\varphi(t) = e^{-t/\tau} \quad (5)$$

x ga bog'liq tenglama

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{1}{\tau_s D_p} \psi = 0$$

Uning yechimi

$$\psi(x) = A \cos\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) + B \sin\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) \quad (6)$$

Yechim $x=0$ ga nisbatan simmetrik bo'lishi kerak, chunki masala shartiga ko'ra plastina ikkala tomoni bir xil sirtiy rekombinasiya tezligiga ega. Shuning uchun $B=0$ va (4), (5) va (6) formulalardan

$$\Delta p = A \cos\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) e^{-t/\tau} \quad (7)$$

kelib chiqadi. (2) chegaraviy shartdan (7) ga asosan ushuni olamiz:

$$D_p A \sin\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) e^{-t/\tau} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_s D_p}} = s A \cos\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) e^{-t/\tau}$$

quyidagicha belgilash kiritamiz:

$$\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}} \operatorname{tg} \frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}} = \frac{sa}{D_p}$$

U holda

$$\eta = \frac{a}{\sqrt{\tau_s D_p}}$$

$$\text{va} \quad \eta \operatorname{tg} \eta = \frac{sa}{D_p} \quad (8)$$

(8) transtendent tenglama cheksiz ko'p yechimga ega (demak τ , ham); η_1, η_2, \dots , bunda $\eta_1 < \eta_2 < \eta_3, \dots$ (3) tenglamaning yechimini quyi lag'i ko'rinishda yozish mumkin:

$$\Delta p = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_s D_p}}\right) e^{-t/\tau_n} \quad (9)$$

(9) dan shu narsa kelib chiqadiki, yuqori darajali ildizlar birinchi ildizga nisbatan vaqt bo'yicha tezroq so'nadi. Shuning uchun judayam kichik

bo'lgan uchun (yani boshlanqich o'tish hodisasidan so'ng) birinchi ildizdan boshqa ildizlarini hisobga olmasa ham bo'ladi. U holda

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_p} + \frac{1}{r_{s1}}$$

Bu yerda $\frac{1}{r_{s1}} = \frac{\eta_1^2 D_p}{a^2}$.

Kichik s lar uchun, ya'ni $\frac{sa}{D_p} \ll 1$ bo'lganda, (8) tenglamada eng kichik ildiz uchun $tg \eta \approx \eta$

deb olish mumkin. U holda $\frac{a^2}{r_{s1} D_p} = \frac{sa}{D_p}$ va $s = \frac{a}{r_{s1}} = a \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_p} \right) = 100 \text{ sm/s}$

4.76. Hajm bo'yi ha bir jinsli generatsiya to'xtagandan so'ng nomuvozanatli zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarish qonuniyatini hisoblaymiz:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \text{div} j_p, \quad (1)$$

bu yerda

$$j_p = -D_p \text{grad} \Delta p$$

Chegaraviy shartlar quyidagicha (x o'qi plastinka sirtiga perpendikular)

$$\begin{cases} D_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x} = -s_1 \Delta p, & x = a, \\ D_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x} = s_2 \Delta p, & x = -a \end{cases}$$

(1) tenglamani o'zgaruvchilarini ajratish usuli bilan yechamiz (75 masala bilan solishtiring):

$$\Delta p = (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x) e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

bu yerda $\alpha = \frac{1}{\sqrt{\tau_2 D_p}}$, $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_c}$.

(2) ni chegaraviy shartga qo'yamiz

$$\begin{cases} -A \sin \alpha a + B \cos \alpha a = -\frac{s_1}{D_p \alpha} (A \cos \alpha a + B \sin \alpha a), \\ A \sin \alpha a + B \cos \alpha a = \frac{s_2}{D_p \alpha} (A \cos \alpha a - B \sin \alpha a). \end{cases}$$

yoki

$$\begin{cases} A(-\eta \text{tg} \eta + k_1) + B(k_1 \text{tg} \eta + \eta) = 0, \\ A(\eta \text{tg} \eta - k_2) + B(k_2 \text{tg} \eta + \eta) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Bu $\eta = \alpha a = \frac{a}{\sqrt{\tau_2 D_p}}$, $k_1 = \frac{as_1}{D_p}$, $k_2 = \frac{as_2}{D_p}$.

Bir jinsli tenglamalar sistemasi (3) notrivial yechimlarga ega, agar quyidagi shart bajarilsa

$$\begin{vmatrix} -\eta \operatorname{tg} \eta + k_1 & k_1 \operatorname{tg} \eta + \eta \\ \eta \operatorname{tg} \eta - k_2 & k_2 \operatorname{tg} \eta + \eta \end{vmatrix} = 0$$

Bundan

$$\operatorname{tg}^2 \eta + 2 \operatorname{tg} \eta \frac{\eta^2 - k_1 k_2}{\eta(k_1 + k_2)} - 1 = 0. \quad (4)$$

(4) transcendent tenglama cheksiz sonli yechimga ega: $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots$ (2) Tenglamani yechimini endi quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta p = \sum_{j=1}^{\infty} \left[A_j \cos \left(\frac{x}{\sqrt{\tau_j D_p}} \right) + B_j \sin \left(\frac{x}{\sqrt{\tau_j D_p}} \right) \right] e^{-\eta_j x}$$

4.75-masaladagi kabi sekin so`nuvchi hadni olib qolamiz. U holda

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_{s1}}, \quad \frac{1}{\tau_{s1}} = \frac{\eta_1^2 D_p}{a^2} \quad (5)$$

$\eta_1 \ll \frac{\pi}{2}$ holni qarab chiqamiz, bunda $\operatorname{tg} \eta_1 = \eta_1$ va (4) tenglama quyidagi

ko`rinishga keladi:

$$\eta_1^2 k_1 + \eta_1^2 k_2 + 2\eta_1^2 - 2k_1 k_2 - k_1 - k_2 = 0.$$

Bundan

$$\eta_1^2 = \frac{k_1 + 2k_1 k_2 + k_2}{k_1 + k_2 + 2} \quad (6)$$

Quyidagi $k_1 \ll 1$ va $k_2 \ll 1$ shartlar bajarilganda, yoki

$$\frac{a s_1}{D_p} \ll 1, \quad \frac{a s_2}{D_p} \ll 1. \quad (7) \text{ bo'lganda (6) ifodadan kelib chiqadiki, } \eta_1 \ll 1.$$

(6) va (5) formulalardan

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{D_p}{a^2} \frac{s_1 + s_2 + 2s_1 s_2 \frac{a}{D_p}}{s_1 + s_2 + 2 \frac{D_p}{a}}$$

ni topamiz, yoki (7) tengsizlikni hisobga olib,

$$\frac{1}{\tau_1} \cong \frac{1}{\tau_p} + \frac{s_1 + s_2}{2a}$$

ifodani hosil qilamiz. Agar $s_1 \gg s_2$ bo`lsa, u holda

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{s_1}{2a}$$

Undan

$$s_1 = 2a \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_p} \right) = 800 \text{ sm/s.}$$

4.77. Sirtiyl rekombinatsiya markazlari tomonidan elektronlarning tutilish absolyut (mutloq) maromi $u_n = c_n [(1-f_1)n_1 - n_{s1}f_1]$ ga teng, bunda f_1 - tuzoqlarning elektronlar bilan to'la qismi, n_1 - yarimo'tkazgich sirtidagi elektronlar konsentratsiyasi, n_{s1} - muvozanat holdagi yarimo'tkazgich sirtidagi elektronlar konsentratsiyasi, bunda Fermi sathi tuzoqlar sathi bilan mos tushadi, C_n - hammasi tuzoqlar bo'shligida bitta elektronning tutilish ehtimolligi. Xuddi shunga o'xshash kovaklar tutilishining absolyut maromi uchun yozamiz:

$$u_p = c_p [f_1 p - p_{s1}(1-f_1)].$$

Statsionar holda $u_n = u_p = u$. Ushbu shartdan f_1 ni topib va topilgan ifodani elektronlar tutilish absolyut maromi uchun ifodaga qo'yib, u ni topamiz:

$$u = \frac{c_n c_p (p_s n_s - p_{s1} n_{s1})}{c_n (n_s + n_{s1}) + c_p (p_s + p_{s1})},$$

bu yerda

$$p_s = p_{s0} + \Delta p_s = p_{s0} \exp\left(-\frac{eF_p}{kT}\right),$$

$$n_s = n_{s0} + \Delta n_s = n_{s0} \exp\left(\frac{eF_n}{kT}\right).$$

Bu yerda kovaklar va elektronlar uchun Fermi kvazisathlari. "O" indeksi bilan muvozanatdagi kattaliklar bejilangan:

$$p_{s0} = n_1 \exp\left(-\frac{e\psi_s}{kT}\right), \quad n_{s0} = n_1 \exp\left(\frac{e\psi_s}{kT}\right).$$

So'ngra

$$p_{s1} = n_1 \exp\left(\frac{E_i - E_i}{kT}\right), \quad n_{s1} = n_1 \exp\left(\frac{E_i - E_i}{kT}\right).$$

Bunda $E_i = \frac{E_s + E_p}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p}{m_n}$ (4.1-masala bilan solishtiring), n_1 - xususiy

yarimo'tkazgichdagi konsentratsiya. Ma'lumki, $p_s n_s = p n$; $p_{s1} n_{s1} = n^2$, shuning

uchun
$$u = \frac{c_n c_p (pn - n^2)}{c_n (n_{s0} + \Delta n_s + n_{s1}) + c_p (p_{s0} + \Delta p_s + p_{s1})}.$$

Injeksiya uncha katta bo'lmagan darajasi uchun:

$$u = \frac{c_n c_p (p_0 + n_0) \Delta n}{c_n (n_{s0} + n_{s1}) + c_p (p_{s0} + p_{s1})}.$$

Quyidagicha belgilash kiritib

$$\frac{c_n}{c_p} = e^{\frac{2e\psi_s}{kT}}, \quad (2)$$

(1) dagi maxrajning shaklini almashtirib va u uchun olingan ifodani $s = \frac{u}{\Delta n}$ ga

$$\text{qo'yamiz: } s = \frac{\sqrt{c_p c_n} (p_0 + n_0)}{2n \left[\text{ch} \left(\frac{E_i - E_i - e\psi_0}{kT} \right) + \text{ch} \frac{e(\psi_s - \psi_0)}{kT} \right]}$$

bu yerda $c_n = N_i \langle \alpha_n \rangle$, $c_p N_i \langle \alpha_p \rangle$. Bunda $\langle \alpha_n \rangle$ va $\langle \alpha_p \rangle$ - elektron va kovaklarning sirtiy sathlarda tutilish ehtimolligi bo'lib, ular tutilish effektiv kesimining issiqlik tezligiga ko'paytmasiga teng. Shuning uchun sirtiy rekombinatsiya teziigi uchun quyidagini yozish mumkin:

$$s = \frac{N_i \sqrt{\langle \alpha_n \rangle \langle \alpha_p \rangle} (n_0 + p_0) / 2n}{\text{ch} \left(\frac{E_i - E_i - e\psi_0}{kT} \right) + \text{ch} \frac{e(\psi_s - \psi_0)}{kT}} \quad (3)$$

4.78*. Oldingi masaladagi (3) ifodaning ekstremumi uchun

$$\frac{ds}{d\psi_s} = 0 = -\frac{e}{kT} \frac{N_i \sqrt{\langle \alpha_n \rangle \langle \alpha_p \rangle} (n_0 + p_0) / 2n}{\left\{ \text{ch} \left(\frac{E_i - E_i - e\psi_0}{kT} \right) + \text{ch} \left[\frac{e(\psi_s - \psi_0)}{kT} \right] \right\}^2} \text{sh} \frac{e(\psi_s - \psi_0)}{kT} \quad \text{dan}$$

quyidagini olamiz:

$$\text{sh} \left[\frac{e(\psi_s - \psi_0)}{kT} \right] = 0$$

Bundan $s = s_{\max}$ da $\psi_s = \psi_0$ (oldingi masaladagi (2) belgilashga qarang) ekanini olamiz, demak,

$$\frac{s_p}{s_n} = \frac{C_p}{C_n} = e^{\frac{2e\psi_0}{kT}} = 9$$

4.79. (6.2a), (6.3a) va (6.3b) formulalardan quyidagini olamiz:

$$Q' = \frac{\int_0^{\infty} dE \frac{\partial f}{\partial E} E^{r+2}}{\int_0^{\infty} dE \frac{\partial f}{\partial E} E^{r+1}} = kT(r+2) \frac{F_{r+1}(\eta)}{F_r(\eta)}$$

bu yerdan

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left[(r+2) \frac{F_{r+1}(\eta)}{F_r(\eta)} - \eta \right]$$

Aynigan holat uchun α ifodasi quyidagi holga o'tadi:

$$\alpha = -\frac{\pi^2 k}{3e\eta} (r+1)$$

Tipik metall uchun

$$k/e = 86,3 \text{ mkV/K}$$

qiymatni ishlatib, ushbuni olamiz

$$\alpha_{\text{met}} = -8,2 \text{ mkV/K}$$

Metall termo EYuK ining aynigan yarimo'tkazgich termo EYuK iga nisbati quyidagicha bo'ladi:

$$\frac{\alpha_{met}}{\alpha_{yor}} = \frac{m_{met}}{m_{yor}} \left(\frac{n_{yor}}{m_{met}} \right)^{3/2} = 5 \cdot 10^{-2}$$

Shunday qilib, metallarda erkin elektronlarning katta konsentratsiyada mavjudligi uchun metalldagi termo EYuK ko'pchilik yarimo'tkazgichlar termo EYuK dan ancha kichik ekan.

4.80. Temperatura uncha baland bo'lmaganda, kovaklar konsentratsiyasi elektronlarnikidan katta bo'lganda termo EYuK ga asosan kovaklar hissa qo'shadilar ((6.6) formulaga qarang). Aralashma sohasida kovaklar konsentratsiyasi deyarli o'zgarmas qoladi, termo EYuK esa musbat bo'lib quyidagiga teng:

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(\ln \frac{N_v(T_0)}{p_0} + \frac{3}{2} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{Q_v^*}{kT} \right)$$

Ushbu sohada termo EYuK temperaturaga nisbatan sekin o'sadi. Xususi sohada termo EYuK ga ikkala turdagi zaryad tashuvchilar hissa qo'shadilar:

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(\frac{b-1}{b+1} \frac{E_g}{2kT} + \frac{3}{4} \ln \frac{m_n}{m_p} - \frac{b}{b+1} \frac{Q_p^*}{kT} - \frac{1}{b+1} \frac{Q_n^*}{kT} \right)$$

Bunda b - elektronlar va kovaklar harakatchanliklari nisbati,

Q_n^* va Q_p^* esa mos ravishda elektron va kovaklarning ko'chish energiyasi. Yuqori temperaturagacha dumaloq qavs ichidagi

birinchi had asosiy rol o'ynaydi va germaniyda $b > 1$ bo'lgani uchun termo EYuK manfiy va temperatura ortishi bilan absolyut kattaligi bo'yicha kamayadi. O'rtacha temperaturalar sohasida aralashmali holatdan xususi holatga o'tayotganda: termo EYuK ishorasini o'zgartiradi. Termo EYuK ning taxminiy yo'li 20-rasmda ko'rsatilgan.

4.81. p - turdagi sayoz holatli tipik aralashmali germaniy uchun aralashma sohasining chegarasini aniqlaymiz ($E_n - E_g = 0,01eV$). Xuddi 4.18-masalada ko'rilgandek, quyidagi tenglamalarni olamiz:

$$y_1 = \ln \frac{N_v(T_0)}{4g_n N_n} - \frac{3}{2} y_2, \quad y_2 = \ln \frac{N_v(T_0)}{N_n} - \frac{E_g}{2k} - \frac{3}{2} y_2.$$

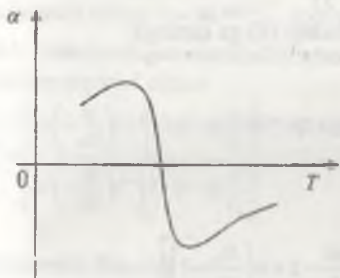
Bunda oldingidek

$$E_g = \Delta - \xi T$$

$$T_n = \frac{E_n - E_g}{k} = 116K.$$

$$T_0 = \frac{\Delta}{2k} = 4,5 \cdot 10^3 K, \quad y_1 = T_0 / T_1, \quad y_2 = T_0 / T_2$$

Bulardan topamiz ($g_n \sim 1$ bo'lganda):



20- rasm

$$y_1 = 4 - 1,5 \ln y_1$$

$$y_2 = 13,2 - 1,5 \ln y_2$$

$$y_1 = 2,6$$

$$y_2 = 9,8$$

$$T_1 = 44K$$

$$T_2 = 460K$$

Shunday qilib, 200K da Fermi sathini quyidagi formula orqali ifodalash mumkin:

$$F = kT \ln \frac{N_0}{N_a}$$

Termo EYuK quyidagiga teng $\alpha = \frac{k}{e} \left(2 + \ln \frac{N_D}{N_a} \right) = 0,7 mV / K$

4.82. Qaralayotgan shartda Fermi sathi quyidagi ifoda orqali hisoblanadi (4.22-

masalaga qarang): $F = E_D + kT \ln \left[\frac{1}{g_D} \left(\frac{N_D}{N_a} - 1 \right) \right]$

ko'chish energiyasi esa quyidagicha (1-masaladagi (1) ga qarang):

$$Q^* = kT \cdot (r+2) \frac{F_{r+1}(\eta)}{F_r(\eta)} = 2kT$$

F va Q* uchun topilgan ifodalarni (6.1) ifodaga qo'yib

$$\alpha = - \frac{k}{e} \left\{ \frac{E_D}{kT} + 2 - \ln \left[\frac{1}{g_D} \left(\frac{N_D}{N_a} - 1 \right) \right] \right\}$$

ni hosil qilamiz. Bundan $|E_D| + kT \ln g_D = kT \left[\frac{e|\alpha|}{k} - 2 + \ln \left(\frac{N_D}{N_a} - 1 \right) \right]$

va $g_a = 2$ bo'lganda $|E_D| = 0,2 eV$

4.83. Ixtiyoriy dispersiya qonuni uchun

$$Q^* = \frac{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) \left(\frac{dE}{dk} \right)^2 k^{2r}(E) E}{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) \left(\frac{dE}{dk} \right)^2 k^{2r}(E)}$$
 ga egamiz.

Kuchli aynigan hol uchun (1.6) yoyilmani qo'llab, ushuni topamiz:

$$\frac{Q^*}{kT} = \eta + \frac{\pi^2}{3\eta} \frac{\eta}{k^{2r}(F) \cdot \left(\frac{d\eta}{dk(F)} \right)^2} \frac{d}{d\eta} \left[k^{2r}(F) \cdot \left(\frac{d\eta}{dk(F)} \right)^2 \right]$$

Bu yerdan termo EYuK ni topamiz

$$\alpha = - \frac{\pi^2}{3\eta} \frac{k}{e} \frac{\eta}{k^{2r}(F) \cdot \left(\frac{d\eta}{dk(F)} \right)^2} \frac{d}{d\eta} \left[k^{2r}(F) \cdot \left(\frac{d\eta}{dk(F)} \right)^2 \right]$$

(6.5) dagi ta'rifdan, Fermi energiyasiga teng energiyada $m_p^* = \hbar^2 k(F) \frac{dk(F)}{dF}$ ekanligi kelib chiqadi. (1) formuladan $\frac{dk(F)}{d\eta}$ ni m_p^* orqali $k(F)$ ni esa

konsentratsiya orqali ifodalab, aynigan elektron gaz uchun termo EYuK ning konsentratsiyaga bog'lanishi topiladi.

$$\alpha = -\frac{k}{e} \cdot \frac{2\pi^2}{3\hbar^2} (kT) \frac{m_p^*}{(3\pi^2 n)^{2/3}} \left(r+1 - 3 \frac{n}{m_p^*} \frac{dm_p^*}{dn} \right)$$

Elektronlar dispersiya qonuni (1.3 j) o'rinli bo'lgan yarimo'tkazgich uchun (14-masalaga qarang)

$$m_p^* = m(0) \sqrt{1 + \frac{2\hbar^2}{m(0)E_g} \cdot (3\pi^2 n)^{2/3}}$$

Ushbu ifodani (2) ga qo'yib va masala shartidagi son qiymatlarini qo'yib, indiy antimonidi uchun $\alpha = 46 \text{ mK} / K$ topiladi.

4.84. Sohalarning hiperparabolikligidan birinchi tartibli tuzatmani hisobga olib, o'tish energiyasi uchun

$$Q = \frac{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) E^{r+2} \left[1 + (r-3) \frac{E}{E_g} \right]}{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) E^{r+1} \left[1 + (r-3) \frac{E}{E_g} \right]} = kT(r+2) \frac{F_{r+1}(\eta) \frac{(r-3)(r+3)}{E_g} kTF_{r+2}(\eta)}{F_r(\eta) \frac{(r-3)(r+2)}{E_g} kTF_{r+1}(\eta)}$$

ni yozamiz. Bundan

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left[(r+2) \frac{F_{r+1}(\eta) \frac{(r-3)(r+3)}{E_g} kTF_{r+2}(\eta)}{F_r(\eta) \frac{(r-3)(r+2)}{E_g} kTF_{r+1}(\eta)} - \eta \right]$$

Kuchli aynigan elektron gaz uchun ushbu ifoda oldingi masaladagi ifoda bilan bir xil bo'ladi, agar $\frac{E}{E_g}$ bo'yicha qatorga yoyib, 1-tartibli tuzatma bilan

chegaralansa.

4.85. Elektronlar harakatchanligi akustik tebranishlarda sochilishi bilan aniqlanganligi uchun, $a \approx 1$ va $l_f \approx 0,12 \text{ sm}$ deb olib

$$\alpha_f \approx \frac{\theta_g \cdot l_f}{\mu} \approx 10 \text{ mV} / K \text{ ni aniqlaymiz.}$$

4.86. Harakatchanlikka akustik tebranishlarda sochilishning nisbiy ulushini tavsiflaydigan a ning kattaligini baholaymiz:

$$a \approx \frac{(\mu_{\text{mech}})_{\text{mech}}}{(\mu_{\text{mech}})_{\text{mech}}} \approx 2 \cdot 10^{-1}$$

$(l_f)_{\text{gr}} \approx (l_f)_{\text{mech}}$ deb olib, termo EYuK "fonon" tashkil etuvchisi uchun,

$$\frac{(\alpha_r)_{InSb}}{(\alpha_r)_{Ga}} = \frac{a_{InSb}}{a_{Ga}} \frac{g_{InSb}}{g_{Ga}} \frac{\mu_{Ga}}{\mu_{InSb}} = 10^{-3}$$

Shunday qilib, n-turli indiy antimonidida fononlar hisobiga elektronlar ko'payishi germaniydagiga nisbatan ancha kichik. Oldingi masaladan topilgan $(\alpha_r)_{Ga}$ qiymatidan foydalanib, 20K dagi $(\alpha_r)_{InSb} \approx 10 \text{ MKV/K}$ ni olamiz.

4.87. Zaryad tashuvchilar dispersiyasining kvadratik qonuni uchun (6.2b), (6.3v), (6.3g) lardan kuchli magnit maydoni uchun $\sigma_2 \gg \sigma_1$, ($q_2 \gg q_1$) bo'lganda:

$$Q^* = \frac{q_2}{\sigma_2} = \frac{\langle E \rangle}{\langle I \rangle} = \frac{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) E k^3(E)}{\int_0^\infty dE \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) k^3(E)} = \frac{5}{2} kT \cdot \frac{F_{3/2}(\eta)}{F_{1/2}(\eta)}$$

Bunday kelib chiqadiki, termo EYuK

$$\alpha(\infty) = \frac{k}{e} \left[\frac{5}{2} \frac{F_{3/2}(\eta)}{F_{1/2}(\eta)} + \eta \right]$$

$\omega \gg 1$ maydon sohasida α magnit maydonga va sochilish meqanizmiga bog'liq emas. Oxirgi holat kuchli maydonda termo EYuK ni zaryad tashuvchilar effektiv massasini aniqlash usuli bilan topishni qulaylashtiradi: aynimagan gaz uchun $\alpha(\infty) = \frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} + \eta \right)$.

Ushbu formuladan $\eta = 3$ ni topamiz: shunday qilib, kovakli gazni aynimagan deb olish yaxshi tasdiqlanadi. Kovaklar konsentratsiyasini bilgan holda kovaklar effektiv soni

$$N_0 = p \cdot e^n = 1,18 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}, \text{ bundan } m_p = 0,6m_0$$

4.88. Kvadratik dispersiya qonuniga bo'ysunuvchi aynimagan yarimo'tkazgich uchun:

$$\alpha = \alpha(H) \Big|_{H=0} = -\frac{k}{e} [(r+2) - \eta], \quad \alpha(\infty) = \alpha(H) \Big|_{H \rightarrow \infty} = -\frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} - \eta \right)$$

$$\text{va demak, } \Delta\alpha(\infty) = \alpha(\infty) - \alpha = -\frac{k}{e} \left(\frac{1}{2} - r \right)$$

Bundan, xususan shu narsa kelib chiqdiki, $r = \frac{1}{2}$ da, $\Delta\alpha(\infty)$ nolga ayianadi. Ya'ni, shu holatdagi sochilish optik tebranishlarda sodir bo'ladi va temperatura Debay temperaturasidan past bo'ladi.

4.89. Kuchli magnit maydon holida ($\mathcal{G} \gg 1$), ko'chish energiyasi sochilish mexanizmiga bog'liq emas va elektron gazining kuchli aynigan holi uchun u quyidagiga teng:

$$Q^* = \frac{\langle E \rangle}{\langle 1 \rangle} = kT \cdot \eta \frac{1 + \frac{\pi^2}{6k^3(F)\eta} \frac{d^2}{d\eta^2} \eta k^3(F)}{1 + \frac{\pi^2}{6k^3(F)} \frac{d^2}{d\eta^2} k^3(F)}$$

bu yerdan ixtiyoriy dispersiya qonuni uchun

$$\alpha(\infty) = -\frac{\pi^2 k}{e} \cdot \frac{1}{k(F)} \cdot \frac{dk(F)}{d\eta} \text{ ni olamiz.}$$

(6.5) ta'rifga ko'ra, m^* kattalik quyidagiga teng:

$$m^* = \hbar^2 k(E) \frac{dk(E)}{dE}$$

Ixtiyoriy dispersiya qonuni uchun izotrop holda $k(F) = (\pi^2 n)^{\frac{1}{3}}$ bo'lishi uchun, $\alpha(\infty)$ uchun quyidagi ko'rinish o'rinni:

$$\alpha(\infty) = -\frac{\pi^2 k}{e} kT \cdot \frac{m^*_F}{\hbar^2 (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

Bu yerda $m^*_F = m^*$ ning Fermi energiyasidagi qiymati. Masala shartidagi berilganlarni qo'yib, $m^*_F = 0.019m_0$ ni topamiz. 4.14-masaladagi m^* formulasiga murojaat qilib, elektronlarning soha tubidagi effektiv massasini topamiz:

$$m(0) = -\frac{\hbar^2 (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}}{E_g} + \sqrt{\frac{\hbar^4 (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}}{E_g^2} + m^{*2}_F} = 0.013m_0$$

4.90. 4.83-masaladagi (2) ifoda va 4.89-masaladagi (1) ifodadan foydalanib, kvadratik dispersiya qonuni aynigan yarimo'tkazgich uchun magnit maydon bo'lmagandagi termo EYuK va kuchli magnit maydonidagi termo EYuK orasidagi bog'lanishni topish mumkin:

$$\alpha = \frac{2}{3} \alpha(\infty)(r+1)$$

Undan

$$r = \frac{3}{2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha(\infty)} - 1 = 1.8$$

Shunday qilib, qaralayotgan holda sochilish asosan zaryadlangan aralashmalarda yuz beradi.

4.91. 4.83 masaladagi (2) va 4.89-masaladagi (1) dan

$$\alpha = \frac{2}{3} \alpha(\infty) \left(r+1 - 3 \frac{n}{m^*_F} \cdot \frac{dm^*_F}{dn} \right)$$

ni olamiz. Shuning uchun

$$\Delta\alpha(\infty) = \alpha(\infty) - \alpha = -\frac{1}{3} \alpha(\infty) \left[6 \frac{n}{m^*_F} \frac{dm^*_F}{dn} - (2r-1) \right] \quad (1)$$

Berilgan dispersiya qonuni uchun (6.5) ta'rifga ko'ra

$$\frac{m^*}{m} = 0,023 + 1,35 \cdot 10^{-15} k^2 (cm^{-2}) = 0,023 + 1,3 \cdot 10^{-14} n^{\frac{2}{3}}. \quad (2)$$

(1) ifodada kvadrat qavs va u bilan birga $\Delta\alpha(\infty)$ nolga teng bo'ladi. U holda

$$\frac{n}{m^*} \frac{dm^*}{dn} = \frac{2r-1}{6}. \quad (3)$$

(2) bog'lanishi hisobga olinsa, ushbu shart quyidagicha bo'ladi:

$$\frac{2}{3} \frac{1,3 \cdot 10^{-14} n^{\frac{2}{3}}}{0,023 + 1,3 \cdot 10^{-14} n^{\frac{2}{3}}} = \frac{2r-1}{6}$$

Shunday qilib, $\Delta\alpha(\infty)$ quyidagi konsentratsiyada nolga aylanadi:

$$n = 2,26 \left(\frac{2r-1}{5-2r} \right)^{\frac{3}{2}} 10^{18} sm^{-3} \approx 10^{19} sm^{-3}$$

U holda dispersiya qonuni (1.3) ko'rinish oladi.

$$\frac{m^*}{m_0} = \frac{m(0)}{m_0} \sqrt{1 + \frac{2\hbar^2}{m(0)E_g} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}}$$

(4.14-masalaga qarang) va $\Delta\alpha(\infty)$ ning nolga aylanish sharti quyidagicha bo'lib qoladi:

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{2\hbar^2}{m(0)E_g} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}} = \frac{3}{2}$$

Ushbu shart hech qanday konsentratsiyada bajarilmaydi, demak (1.3) dispersiya qonuni uchun $\Delta\alpha(\infty)$ nolga aylanmaydi.

4.92. p-turdagi yarimo'tkazgichni qarab chiqamiz. U holda (7.1) ifodaga $n=0$ ni qo'yish lozim:

$$\varepsilon = \int \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} dx = \int \frac{D_p}{p\mu_p} dp$$

Integral ostidagi funksiya p bir qiymatli ((3.6) bilan solishtiring) va butun kontur bo'yyicha integral nolga teng. Bu foto EYuK ning bipolyar xarakteri haqida guvohlik beradi.

4.93. Avval (7.3) bo'yyicha ventil foto EYuK ε_1 ni hisoblaymiz; undagi p_0 ni tushurib qoldirsak,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{kT}{e} \int_A^B \frac{b+1}{bn_0 + (b+1)\Delta n} \frac{\Delta n}{n_0} \frac{dn_0}{dx} dx = \frac{kT}{e} \Delta n \frac{b+1}{b} \int_A^B \frac{n_0^{-1} dn_0}{n_0 + \frac{b+1}{b} \Delta n} = \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \frac{b+1}{b} \frac{\Delta n}{n_{0,A}}}{1 + \frac{b+1}{b} \frac{\Delta n}{n_{0,B}}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \frac{\Delta\sigma}{n_{0,A}}}{1 + \frac{\Delta\sigma}{n_{0,B}}} \end{aligned}$$

Ikkinchi qo'shiluvchi E_2 (7.4) integralni, A va B yaqinidagi kichik interval kenglik 2ε bo'yicha ikki qismga bo'lamiz, bunda $\frac{d\Delta n}{dx} \neq 0$:

$$\varepsilon_2 = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \left[\int_{A-\varepsilon}^{A+\varepsilon} \frac{d\Delta n}{\Delta n + \frac{bn_0}{b+1}} + \int_{B-\varepsilon}^{B+\varepsilon} \frac{d\Delta n}{\Delta n + \frac{bn_0}{b+1}} \right] = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \left[\ln \frac{\Delta n + \frac{bn_{0,A}}{b+1}}{\frac{bn_{0,A}}{b+1}} + \ln \frac{\Delta n + \frac{bn_{0,B}}{b+1}}{\frac{bn_{0,B}}{b+1}} \right]$$

$$= -\frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{1 + \frac{b+1}{b} \frac{\Delta n}{n_{0,A}}}{1 + \frac{b+1}{b} \frac{\Delta n}{n_{0,B}}}$$

ε_1 va ε_2 larni qo'shib, topamiz:

$$E = \frac{2}{b+1} \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \Delta\sigma \rho_{0,A}}{1 + \Delta\sigma \rho_{0,B}} = 1,17 \cdot 10^{-2} V.$$

4.94. Oldingi masala javobidan, $\Delta\sigma/\sigma_0 \ll 1$ chegaraviy shart uchun

$$E = \frac{2}{b+1} \frac{kT}{e} \Delta\sigma (\rho_{0,A} - \rho_{0,B})$$

va teskari chegaraviy holdagi $\Delta\sigma/\sigma_0 \gg 1$ uchun:

$$\varepsilon = \frac{2}{b+1} \frac{kT}{e} \ln \frac{\rho_{0,A}}{\rho_{0,B}}$$

qaralayotgan hollarda: $\Delta\sigma_1 \rho_{0,A} = 0,1 \ll 1$, $e' = 3,4 \cdot 10^{-1} V$;
 $\Delta\sigma_2 \rho_{0,B} = 16 \gg 1$, $e'' = 3,0 \cdot 10^{-1} V$.

4.95*. ρ ni Δl ga siljishdagi o'zgarishi uncha katta emas deb olib,

$$\rho(x + \Delta l) = \rho(x) + \frac{d\rho}{dx} \Delta l$$

deb yozish mumkin.

4.93-masaladagi ε uchun formuladan

$$\varepsilon = \frac{2}{b+1} \frac{kT}{e} \left(\frac{\Delta\sigma \cdot \Delta l \cdot \frac{d\rho}{dx}}{1 + \Delta\sigma \cdot \rho} \right),$$

bunda qavs ichidagi ifoda kichik deb tasavvur qilamiz.

Bundan

$$\int_{\rho_0}^{\rho} \frac{C \cdot \Delta\sigma}{1 + \Delta\sigma \cdot \rho} = \frac{A(b+1)e}{2kT\Delta l} \int_0^x \frac{dx}{1+Bx} = C \ln(1+Bx)$$

bu yerda

$$C = \frac{A(b+1)e}{B 2kT \cdot \Delta l} = 0,89.$$

Birinchi ifodani ρ bo'yicha integrallab:

$$\frac{1 + \Delta\sigma\rho(x)}{1 + \Delta\sigma\rho(0)} = (1 + Bx)^C$$

ni topamiz, undan: $\rho(x) = \frac{(1 + \Delta\sigma\rho(0))(1 + Bx)^{C-1}}{\Delta\sigma}$

va $\Delta\sigma = \Delta n \cdot e\mu_n(b+1) = 4,7 \Omega^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$

$x=2$ da $\rho = 4,9 \Omega^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$ ni olamiz. Tekshirishlar shuni ko'rsatadiki, yuqoridagi farazlar to'la bajariladi.

4.96. (7.3) formula bo'yicha quyidagini topamiz:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{kT}{e} \frac{b+1}{b} \Delta n \int_{-1}^0 dx \frac{1}{n_0 \left(n_0 + \Delta n \frac{b+1}{b} \right)} \frac{dn_0}{dx} = \frac{kT}{e} \frac{b+1}{b} \Delta n \int_{n_p}^{n_0} \frac{dn_0}{n_0 \left(n_0 + \Delta n \frac{b+1}{b} \right)} = \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{n_p \left(n_0 + \Delta n \frac{b+1}{b} \right)}{n_n \left(n_p + \Delta n \frac{b+1}{b} \right)} \end{aligned}$$

Qaralayotgan sharoitda (2-ilovadagi jadvalga qarang), 4.1-masaladan (1)

formulaga asoslanib $n_n = 10^{-7} \text{sm}^{-3}$, $n_p = \frac{n_n^2}{n_0} = 10^{-29} \text{sm}^{-3}$, $\frac{kT}{e} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{V}$

bo'lgani uchun quyidagi natijani olamiz: $\varepsilon_1 \approx -0,11 \text{V}$.

4.97. (7.2) formuladan foydalanib (shuningdek 4.46*, 4.47*-masalalarga qarang) quyidagini topamiz:

$$n_0(x) = n'_0(1 - \xi x), \quad \xi = 0,2 \text{sm}^{-1},$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{kT}{e} \int_0^1 dx \frac{(1-b)N \left[-\frac{1}{L} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \right] + b\xi n'_0}{bn'_0(1-\xi x)} = \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b} \frac{N}{n'_0} \int_0^1 dx \frac{e^{-x/L}}{1-\xi x} + \frac{kT}{e} \int_0^1 \frac{\xi dx}{1-\xi x} \\ & \quad z = x/L \end{aligned}$$

Birinchi integralda $z \leq 1$ va mahrajni 1 ga almashtirish mumkin, chunki $L = 0,2 \cdot 0,01 \ll 1$.

Integrallash natijasi: $\Delta\varphi = \frac{kT}{e} \left(\frac{b-1}{b} \frac{N}{n'_0} + \ln \frac{1}{1-\xi d} \right)$ ga teng bo'ladi.

Undan $\Delta\varphi = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{V}$

4.98. (7.2) dan (7.3) va (7.4) formulalardan kelib chiqqani kabi, birinchi holda

$\Delta\rho = \Delta n \tau_p / \tau_n$ da, quyidagini topamiz:

$$\varepsilon_1 = \frac{kT}{e} \int dx \frac{b + \tau_p / \tau_n}{bn_0 + (b + \tau_p / \tau_n) \Delta n n_0} \frac{\Delta n dn_0}{dx}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{kT}{e} \int dx \frac{\tau_p / \tau_n - b}{bn_0 + (b + \tau_p / \tau_n) \Delta n} \frac{d\Delta n}{dx}$$

So'ngra, 4.93-masalaga o'xshash holda

$$\varepsilon_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \Delta\sigma \cdot \rho_{0,A}}{1 + \Delta\sigma \cdot \rho_{0,B}}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\tau_p / \tau_n - b}{\tau_p / \tau_n + b} \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \Delta\sigma \rho_{0,A}}{1 + \Delta\sigma \rho_{0,B}}$$

va nihoyat, $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{2\tau_p / \tau_n}{b + \tau_p / \tau_n} \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \Delta\sigma \rho_{0,A}}{1 + \Delta\sigma \rho_{0,B}} = 2,7 \cdot 10^{-3} V$ ga teng bo'ladi.

Ilova 1.

Fermi intervalining ba'zi bir xossalari

Fermi integrali $F_j(\eta)$ quyidagicha aniqlanadi:

$$F_j(\eta) = \frac{1}{\Gamma(j+1)} \int_0^\infty \frac{\varepsilon^j d\varepsilon}{1 + \exp(\varepsilon - \eta)} \quad (I.1)$$

bu yerda $\Gamma(j+1)$ — gamma funksiya. Klassik holda, ya'ni η manfiy va absolut qiymati bo'yicha yetarlicha katta bo'lganda

$$F_j(\eta) \approx e^\eta \quad (I.2)$$

Katta musbat η lar uchun (statistikada bunga deyarli butunlay aynigan hol to'g'ri keladi) quyidagi o'rinli:

$$F_j(\eta) = \frac{\eta^{j+1}}{\Gamma(j+2)} \left[1 + \frac{\pi^2}{6\eta^2} \frac{\Gamma(j+2)}{\Gamma(j)} + \dots \right] \quad (I.3)$$

Fermi integrali $F_{1/2}(\eta)$ uchun ko'pincha quyidagi o'rinli:

$$F_{1/2}(\eta) \approx \frac{e^\eta}{1 + 0,27e^\eta}, \quad (I.4)$$

bunda, $\eta \leq 1,3$ da 3% dan ko'p bo'lmagan xatolik boladi, $\eta \leq 1$ da taqribiy formula:

$$F_{1/2}(\eta) = \frac{4\eta^{3/2}}{3\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{1,15}{\eta^2} \right) \quad (I.5)$$

ham 3% dan katta bo'lmagan xatolikni beradi. Shunday qilib, yaqinlashuvchi (I.4) va (I.5) ifodalar kuchli ayniganlikdan to aynimagan hol (klassik hol) gacha intervaldagi qiymatlarni beradi.

Fermi funksiyalari yoki ularning hosilalarini o'z ichiga olgan integralni baholashda quyidagi qatordan foydalaniladi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} d\varepsilon \cdot \frac{dG(\varepsilon)}{d\varepsilon} \frac{1}{1 + \exp(\varepsilon - \eta)} = -G(\infty) + G(\eta) + \frac{\pi^2}{6} \frac{d^2 G(\eta)}{d\eta^2} + \dots, \quad (I.6)$$

bu yerda $G(\varepsilon)$ — energiyaning ixtiyoriy funksiyasi bo'lib, u $\varepsilon = \eta$ nuqtida atrofida monotondir.

Yarimo'tkazgich materialning ba'zi parametrlari.

	E_g , eV	m_{dn}/m_0	m_{dp}/m_0	$\mu_n(300^0\text{ K}),$ $\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{sek}$	$\mu_p(300^0\text{ K}),$ $\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{sek}$
Ge	0,74	0,56	0,37	3800	1800
Si	1,12	1,08	0,59	1450	500
InSb	0,22	0,013	0,4	78000	750
InAs	0,43	0,023	0,41	33000	460
InP	1,40	0,067	---	4600	150
GaSb	0,80	0,047	0,23	4000	1400
GaAs	1,52	0,068	0,5	8800	400

Ba'zi fizik kattaliklar

Kattaliklar	Belgisi	SI birliklarida	SGS birliklarida
Elektronning tinchlikdagi massasi	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}\text{ kg}$	$9,11 \cdot 10^{-28}\text{ g}$
Elektronning zaryadi	e	$1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Kl}$	$4,8 \cdot 10^{-10}\text{ sgse}$
Plank doimiysi	h	$6,63 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$	$6,63 \cdot 10^{-27}\text{ erg}\cdot\text{s}$
	\hbar	$1,05 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$	$1,05 \cdot 10^{-14}\text{ erg}\cdot\text{s}$
Avagadro soni	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$	$6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
Boltsman doimiysi	k	$1,38 \cdot 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	$1,38 \cdot 10^{-16}\text{ erg}\cdot\text{K}^{-1}$
Gaz doimiysi	R	$8,31\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-16}\text{ erg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektron volt	eV	$1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Kl}$	$1,6 \cdot 10^{-12}\text{ erg}$
Bor magnetoni	$\mu_B = \frac{eh}{2m_e}$	$9,27 \cdot 10^{-24}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	
Vakuumda yorug'lik tezligi	s	$3 \cdot 10^8\text{ m/s}^{-1}$	$3 \cdot 10^{10}\text{ sm/s}^{-1}$
Vakuumning dielektrik singdiruvchanligi	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$	
Vakuumning magnet singdiruvchanligi	μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6}\text{ Gn}\cdot\text{m}^{-1}$	
1 eV energiyali foton to'lqin uzunligi	λ_0	$1,24 \cdot 10^{-6}\text{ m}$	$1,24 \cdot 10^8\text{ sm}$
1 eV energiya foton takroriyligi	ν_0	$2,42 \cdot 10^{14}\text{ Gs}$	$2,42 \cdot 10^{14}\text{ Gs}$

Nazorat savollari:

I. Ideal yarimo`tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning energetik spektri

1. Yarimo`tkazgichlarning boshqa moddalardan farq qiluvchi asosiy xususiyati nimadan iborat?
2. Yarimo`tkazgichlarning tashqi ta`sirlarga sezgirliigi qanday tushuntiriladi?
3. Yarimo`tkazgichlarning elektr o`tkazuvchanligini temperaturaga bog`liqligini tushuntiring.
4. Yarimo`tkazgichning o`tkazuvchanligini faollashtirish energiyasi nima?
5. Kristaldagi elektronlarning energetik spektri izolyatsiyalangan (yakkalangan) atomdagi elektronlarning spektridan qanday farqlanadi?
6. Taqiqlangan zonaning kengligi elektronning yadroga bog`lanish darajasiga qanday bog`liq?
7. Kristaldagi elektron uchun Shredinger tenglamasini yechishdagi bir elektronli adiabatik yaqinlanishning mohiyati nimadan iborat. Bu yaqinlanishdagi to`lqin va energiya funksiyalarining ko`rinishi qanday?
8. Kristaldagi elektronning potensial funksiyasi yakkalangan atomdagi elektronning potensial funksiyasidan qanday farqlari bor?
9. Ideal kristal panjara nima va u elektronning harakatiga qanday ta`sir qiladi?
10. Kroning-Penni modelining mohiyati nimadan iborat?
11. Elektronning kvaziimpulsi deganda nima tushuniladi?
12. Briyullen zonasi nima va uni tuzish qoidalarini ayting.
13. Dispersiya qonuni. Kristalarda elektronlarning dispersiyasi qonunining asoslari.
14. Effektiv massaning fizik mohiyati nimadan iborat?
15. Effektiv massaning izoenergetik yuza egriligi bilan, tezligi va kvaziimpulsi bilan bog`liqligi.
16. Metall, yarimo`tkazgich va dielektriklarning zona tuzilishlari (strukturalari) orasida qanday farqlar bor?
17. Aralashmali holatning vodorodsimon modeli nimadan iborat?
18. Real yarimo`tkazgichlarning zona strukturasi asosiy qonuniyatlari.
19. Taqiqlangan zonaning kengligi tashqi ta`sirga qanday bog`liq?

II. Real yarimo`tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning energetik spektri

1. Xususiy yarimo`tkazgich nima? Xususiy yarimo`tkazgichning faollashtirish energiyasi deb nimaga aytiladi?

2. Donor va akseptorlarni tavsiflang. Kirishmali yarimo'tkazgich xususiy o'tkazuvchanlikka egami?
3. Nuqsonning ta'rifi nima? Nuqtaviy, chiziqiy va yassi nuqsonlarga misol keltiring. Rasional nuqson nima?
4. Kristalarda kirishmalarning qattiq eritma yoki suqilma qattiq eritma hosil qilishining geometrik va elektrokimyoviy omillarining mohiyati nimada?
5. Qattiq eritma hosil qiluvchi kirishmalar elektronlarning energetik spektrlarini qanday o'zgartiradi?
6. Elektr o'tkazuvchanlik nazariyasining asoslari nimadan iborat? Uning yutuq va kamchiliklari.
7. Asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar nima?
8. Germaniy va kremniy temir, nikel mis va qalay bilan legirlansa, uning elektr o'tkazuvchanligi qanday turda bo'ladi?
9. Yarimo'tkazgichlarda kirishmalarning amfoterligi deganda nima tushuniladi?
10. A^{IV} , A^{III} va B^V kristalari uchun amfoter kirishmalarga misol keltiring. F markazlar nima?
11. Kristalarda vakansiyalarning qanday turlari mavjud? A^{IV} , A^{III} , B^V va $A^{II}B^{VI}$ kristalaridagi vakansiyalarning paydo bo'lishini fizik mohiyati (tabiati) nimadan iborat?
12. Vakansiyalar elektronlarning energetik spektrlariga qanday o'zgartirishlar kiritadi?
13. Tamm sathlari nima? Ularning tabiati qanday?
14. Dislokatsiyalar nima? Qirrali va vintli dislokatsiyalarning hosil bo'lish tabiati qanday?
15. Dislokatsiyalarning elektronlarni energetik spektriga ta'siri nimada aks etadi?
16. n- yoki p- turdagi aynigan va aynimagan yarimo'tkazgichlar uchun elektron va kovaklarning konsentratsiyasini grafik usulda tavsiflang.
17. Kuchli aynigan yarimo'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasini temperaturaga bog'liq bo'lmashligini ko'rsating?
18. Aynigan va aynimagan xususiy yarimo'tkazgichlar uchun zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi formulasini keltiring. Ge va Si uchun $T = 300K$ da n_i ni toping.
19. Aynimagan yarimo'tkazgichlarning taqiqlangan zonasining kengligi eksperimental qanday aniqlanadi?
20. $f(E,T)$ funksiya zaryad tashuvchilarning qanday xossalarni tavsiflaydi?
21. Elektronning holatini $f(E,T)$ ning qanday turlari tavsiflaydi?
22. $f_n(E,T)$ va $f_p(E,T)$ funksiyalari orasida qanday bog'lanish bor? Aynigan va aynimagan yarimo'tkazgichlar uchun ularning ko'rinishini aniqlang.
23. Germaniy va kremniyda holat zichliklari uchun elektronlarning va kovaklarning effektiv massa formulalarini keltirib chiqaring.

24. 1-2 tartibli Fermi integrali nima va u qanday hisoblanadi?
25. Ruxsat etilgan zonadagi effektiv holatlar soni qanday hisoblanadi?
26. Ruxsat etilgan zona va aralashmali sathlarda zaryad tashuvchilarning holatlar bo'yicha taqsimoti qanday farq qiladi?
27. Elektroneytrallik tenglamasini umumiy hol uchun yozing va uning ma'nosini tushuntiring.
28. a) Xususiy yarimo'tkazgichlar, b) aynimagan akseptor va donor yarimo'tkazgichlar, v) qisman kompeasirlangan yarimo'tkazgichlar ($N_d > N_a$ va $N_d < N_a$) uchun Fermi sathini temperaturaga bog'liqligining grafigini ko'rsating.
29. Yarimo'tkazgichga aralashma kiritilishi bilan aynishini shart - sharoiti nimadan iborat?
30. Yarimo'tkazgichlardan InAs va Ge ning qaysi biriga uning aynishi uchun ko'proq konsentratsiya aralashma kiritilishi kerak? n va p-tur o'tkazuvchanliklarda aynish konsentratsiyalarini taqqoslang.
31. Taqsimot funksiyasining fizik ma'nosi.
32. Kimyoviy potensial nima?
33. Fermi sathidan yuqori, pastki va sathga to'g'ri keluvchi energetik sathlarning elektronlar bilan to'ldirilishi qanday?
34. Aynigan elektron gaz deb nimaga aytiladi?
35. Xususiy yarimo'tkazgichda kimyoviy potensial qacda joylashgan?
36. Fermi sathi n- va p-turdagi yarimo'tkazgichlarda taqiqlangan zonaning qaysi qismida joylashgan?
37. Qattiq jismlarda mikro kuchlanishlar vujudga kelishi umumiy shartlari qanday?
38. Ko'p qatlamli qattiq jismlar tuzilmalarida mikro kuchlanishlarning qanday asosiy manbalari mavjud?

III. Yarimo'tkazgichlarda kinetik hodisalar

1. Zaryad tashuvchilarning sochilishi deb nimaga aytiladi?
2. Sochilishning effektiv kesimi tushunchasi, uning relaksatsiya vaqti bilan bog'liqligi.
3. Qanday kattaliklar sochilishning miqdoriy o'lchovi bo'ladi?
4. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi tushunchasiga ta'rif bering.
5. Panjaradagi atomlarning tebranishi qanday ifodalanadi va unda zaryad tashuvchilarning sochilishi qanday tavsiflanadi?
6. Qanday kuchlar: a) Elektr o'tkazuvchanlikni, b) Xoll effektini, v) Termo EYuK ini, s) Issiqlik o'tkazuvchanlikni, d) Nernst-Ettingauzen, Nernst effektlarini vujudga kelishiga olib keladi?
7. Dispersion munosabat S dan qanday ma'lumotlar olish mumkin?
8. Kinetik tenglama usulining mohiyati nimadan iborat?

9. Kinetik hodisa o'rganilganda relaksatsiya vaqti yaqinlashishining ma'nosi nima?
10. Kirishmasiz (aralashmasiz) yarimo'tkazgichlarda socqilishning qanday mexanizmlari o'rinni?
11. Har xil defekt (nuqson) larga ega bo'lgan yarimo'tkazgichlarda sochilishning qanday mexanizmlari o'rinni?
12. Debay temperaturasi deb nima aytiladi?
13. Neytral kirishmalarda (neytral va zaryadlangan) zaryad tashuvchilarning sochilishning fizik mohiyati nimadan iborat?
14. Dislokatsiyalarda zaryad tashuvchilarning sochilishini fizikasi nimadan iborat?
15. Bir necha mexanizmlar baravar qatnashganda relaksatsiya vaqtlari qanday qonun asosida qo'shiladi?
16. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va Xoll koeffitsiyenti qanday munosabatda bog'langan?
17. Issiqlik o'tkazuvchanlik mexanizmi.
18. Qanday termoelektr effektlari bor va ularning fizik mohiyati nimadan iborat?
19. Fononlarning elektronlarni olib ketish effektining mohiyati nimada?
20. Issiqlik o'tkazuvchanlikning panjara o'tkazuvchanlik tashkil etuvchisini hosil bo'lishiga sabab nimada? Kuchli aynish holatida yarimo'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasi temperaturaga bog'liq bo'lmasligini ko'rsating.
21. Fononlarning socqilish mexanizmlarini sanab bering (izoqlab bering).
22. Optik va akustik fononlar nima? Fononlarning taqsimot funksiyasi.
23. Normal jarayon va tarqalgan (razbros) jarayonlari nima?
24. Deformasion potensial usulining mohiyati nimadan iborat?
25. Optik va akustik fononlardagi sochilishda relaksatsiya vaqti energiyaga qanday bog'liq?
26. Otkazuvchanlik effektiv massasining fizik ma'nosi.
27. Zonalar aro va qatlamlar aro (mejdolinniy) socqilish tushunchalari
28. Har xil sochilish mexanizmlari uchun zaryad tashuvchilarning harakatchanligini temperaturaga bog'liqligi.
29. Yarimo'tkazgichlar uchun tok va elektr o'tkazuvchanlik ifodalari magnit maydon mavjud bo'lganda qanday o'zgaradi?
30. Qanday termomagnit hodisalarni bilasiz?

IV. Yarimo'tkazgichlarda optik hodisalar

1. Yorug'likning yarimo'tkazgichdagi elektronlar bilan qanday ta'sirlashish turlari bor?
2. To'g'ri (bevosita) va bilvosita (nepryamoy) optik o'tishlar deb nima aytiladi?

3. Qanday o'tishlar ruxsat etilgan (taqiqlanmagan) va ruxsat etilmagan o'tishlar deyiladi?
4. Burshteyn siljishi deb nimaga aytiladi?
5. Yorug'likning kristal panjara bilan ta'sir mexanizmi qanday?
6. Germaniy va kremniy kristalarida kislorod aralashmasining mavjudligi tufayli yorug'lik yutilishida namoyon bo'ladigan yutilish spektrlari qanday to'lqin uzunliklarida kuzatiladi?
7. Aralashma (kirishma) atomlari tomonidan yorug'likning yutilish tabiati qanday?
8. Eksiton nima?
9. Yorug'likning qaysi to'lqin uzunliklari intervalida yorug'likning eksiton yutilishi kuzatiladi?
10. Yorug'likning qaytishini tadqiqot qilish asosida yarimo'tkazgichning qanday xossalari haqida ma'lumot olish mumkin?
11. Faradey effektining mohiyati nimada?

V. Yarimo'tkazgichda zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi

1. Elektron-kovak juftini generatsiya jarayoni deb nimaga aytiladi? Ularning qanday usullari mavjud?
2. Zaryad tashuvchilarning injeksiyasi degan tushunchani ma'nosi nimada?
3. Zaryad tashuvchilarning rekombinatsiya jarayoni deb nimaga aytiladi?
4. Zaryad tashuvchilarning generatsiya va rekombinatsiya tezliklarini ta'rifi qanday?
5. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga ta'rif bering.
6. Zaryad tashuvchilarning stasionar va nostasionar yashash vaqtlari nimalar bilan farqlanadi?
7. Zaryad tashuvchilarning qanday holatiga muvozanatsiz holat deyiladi?
8. Yopishish effektining mohiyati nimada?
9. Rekombinasiyaning qanday turlari mavjud?
10. Rekombinasiyaning qanday mexanizmlari mavjud? Ularning farqlari nimalarda namoyon bo'ladi?
11. Nurlanish yashash vaqtining qiymati yarimo'tkazgichning legirlanish darajasiga bog'liq holda qanday o'zgaradi?
12. Qanday yarimo'tkazgichlarda nurlanish zonalararo rekombinasiyaning exti nolliigi eng katta?
13. Zonalararo to'lqinlanish rekombinasiyaning mohiyati nimadan iborat?
14. Sirtiy rekombinasiya nima?
15. Rekombinasiya kesim yuzasi nimani tavsiflaydi?
16. Diffuzion uzunlik tushunchasining fizik ma'nosi qanday? U zaryad tashuvchilarning yashash vaqti bilan qanday bog'langan?

17. Zaryad tashuvchilarning ortiqcha konsentratsiyasining ixtiyoriy qonuniyat bilan kamayishida yashash vaqti tushunchasi qanday kiritiladi?
18. Fermi sathining holati zaryad tashuvchilar yashash vaqtiga qanday ta'sir qiladi?
19. Shokli-Rid nazariyasiga asosan aniqlangan zaryad tashuvchilarini o'rtacha yashash vaqti yarimo'tkazgichga uncha katta bo'lmagan konsentratsiyada donor kiritilsa o'zgaradimi?
20. Aralashmalarni zaryad tashuvchilarining yashash vaqtiga ta'siri qanday aniqlanadi?
21. Stasionar sharoitda "ortiqcha" zaryad tashuvchilarning fazoviy taqsimoti qanday?
22. Rekombinasiya sathining energetik holati eksperimental qanday aniqlash mumkin?
23. Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning diffuzion uzunligi nimani tavsiflaydi va u eksperimental qanday aniqlanadi?
24. Zaryad tashuvchilarning ekskluziya, ekstraksiya va akkumulyatsiya jarayonlari nimadan tashkil topgan?

VI. Yarimo'tkazgichlarda fotoelektrik hodisalar.

- T. Fotoo'tkazuvchanlik hodisasining moqiyati nima?
2. Fotoo'tkazuvchanlik yorug'likning yutilishi bilan qanday bog'langan?
3. Fotoo'tkazuvchanlikning qizil chegarasi nima?
4. Fototermik ionizasiyaning mexanizmi qanday?
5. Fotoo'tkazuvchanlik vujudga kelishida eksitonlar qatnashadimi?
6. Fotosezgirlikning qanday ta'riflari bor?
7. Mono- va biqutbli aralashmali fotoo'tkazuvchanliklarning farqi nimada?
8. Fotoo'tkazuvchanlikda kirishmalar sathlarining to'ldirilishi qanday rol o'ynaydi?
9. Yarimo'tkazgichning lyuks-ampere xarakteristikasi deb nimaga aytiladi? U qanday parametrlar orqali tavsiflanadi?
10. Fotovoltik hodisa deb nimaga aytiladi?
11. Fotovoltik hodisa ro'y berishi uchun qanday shart - sharoitlar bajarilishi kerak?
12. Hajmiy foto EYuK ning tabiatini tushuntiring.
13. Dember effektining mohiyati nimadan iborat?
14. Fotomagnit EYuK ning vujudga kelish mexanizmi qanday?
15. Fotoluminessensiya hodisasining mohiyati nimadan iborat?
16. Luminessensiyaning qanday turlari bor?
17. Luminessensiya intesivligi qanday omillarga bog'liq?

VII. Kuchli elektr maydonida yarimo`tkazgichlar.

1. Kuchsiz elektr maydoni kristalardagi elektronlarning tezligini qanday qilib o`zgartiradi?
2. Kritik maydon deb nimaga aytiladi?
3. Sochilish mexanizmi zaryad tashuvchilarning harakatchanligini elektr maydon kuchlanganligiga bog`liqligiga qanday ta`sir qiladi?
4. Elektron temperatura tushunchasining fizik ma`nosini tushuntiring. Qanday zaryad tashuvchilar "qaynoq" tashuvchilar deyiladi?
5. Kuchli elektr maydonlarida nima uchun Om qonuni bajarilmay qoladi. Yarimo`tkazgichda qanday effektlar Om qonunining buzilishiga olib kelishi mumkin?
6. Zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasiga kuchli elektr maydonining ta`siri qanday tajribalar asosida isbot qilingan?
7. Kuchli elektr maydonining termoelektrik ionizatsiyaga ta`sir mexanizmi qanday?
8. Termoelektrik ionizatsiya va tunnel effektlarni tajribada qanday farqlash mumkin?
9. Kuchli maydonning to`qnashuv ionizatsiyasiga ta`sir mexanizmi qanday?
10. Qanday maydonlarda yarimo`tkazgichlarda termoelektrik ionizatsiya, tunnel effekt, to`qnashuv ionizatsiyasi, elektr teshilish kuzatiladi?
11. Frans-Keldish effektining mohiyati nimadan iborat?
12. Tok noturg'unligining qanday mexanizmlari bor va ularning mohiyati nimadan iborat?
13. Ganna effektining mohiyati nimadan iborat?

VIII. Kontakt hodisalar

1. Yarimo`tkazgichlarning yuzasida energetik zonalarning egrilanishi qanday tushuntiriladi?
2. Kontakt hodisalarining namoyon bo`lishi nimalarga bog`liq?
3. Elektronning chiqish ishi deb nimaga aytiladi?
4. Kontakt potentsiallar farqi deb nimaga aytiladi?
5. Metall- yarimo`tkazgich kontakti bo`lganda yarimo`tkazgich yuza qatlamida zora strukturasi qanday o`zgaradi?
6. Metall va yarimo`tkazgich orasidagi potentsiallar farqi nimalar bilan aniqlanadi?
7. Ekranlashishning Debay uzunligi nima?
8. Maydon effektining mohiyati nimada?
9. Nima uchun metall-yarimo`tkazgich kontaktida kontakt maydon yarimo`tkazgichga kiradi, metallga umuman kirmaydi?

10. Berkituvchi va antiberkituvchi (antizapirayushiy) qatlamlar deb nimaga aytiladi?
11. Metall-yarimo`tkazgich kontaktida tokning to`g`rilanish mexnizmini tushuntiring.
12. p-n o`tish nima? Uning metall-yarimo`tkazgich kontaktidan farqi nimada?
13. p-n o`tishning VAX.
14. p-n o`tishlarni qanday klassifikasiyalash mumkin?
15. Omik kontaktni tavsiflang. Omik kontaktning qanday turlari bor?
16. Geter o`tish odatiy gomogen o`tishdan qanday farq qiladi?
17. p-n o`tishni tashqi kuchlanish manbaiga ulaganda qaysi yo`nalishni musbat yo`nalish deb hisoblash mumkin?
18. Sirt holatining kontakt hodisalariga ta`siri?

IX. Yarimo`tkazgichlarda magnit hodisalar

1. Bir elektronli atomning natijaviy magnit momenti nimalar bilan aniqlanadi?
 2. Ko`p elektronli atomning natijaviy magni momenti nimalar bilan aniqlanadi?
 3. Qattiq jismlarda magnit atomlarini tartiblashuvining qanday turlari mavjud?
 4. Paramagnitning magnit qabul qiluvchanligi temperaturaga qanday bog`liq?
- Magnit maydonigachi?
5. Almashinuv o`zaro ta`sirining mohiyati nimada?
 6. Yarimo`tkazgichlar uchun magnetizmning qaysi turi xarakterlidir?
 7. Yarim magnetik va magnetik yarimo`tkazgichlar nomagnetik yarimo`tkazgichlardan qanday farqlanadi?
 8. Landau sathlari nima?
 9. Yarimo`tkazgichlarda ossillyatsiya hodisasining tabiatini tushuntiring.
 10. Yarimo`tkazgichlarda mavjud bo`lgan va lokalizatsiyalashgan magnit momentlari qanday effektlarda namoyon bo`ladi?
 11. Tajribada rezonans hodisalari nimalarda namoyon bo`ladi?
 12. Qanday rezonans hodisalar mumtoz fizika nuqtai nazaridan tushuntiriladi?
 13. Qanday rezonans hodisalar kvant mexanikasi asosida tushuntiriladi?
 14. Qanday o`zaro ta`sirlar YaMR ga olib keladi?
 15. Qanday o`zaro ta`sirlar EPR ga olib keladi?
 16. Qanday o`zaro ta`sirlar YaKR ga olib keladi?
 17. Siklotron rezonansning YaKR va EPR dan prinsipial farqi nimadan iborat?
 18. Yarimo`tkazgichlar tadqiqotida YaMR, YaKR va EPR qanday maqsadlar uchun ishlatiladi?
 19. Yarimo`tkazgichlar tadqiqotida siklotron rezonans qanday maqsadlar uchun qo`llaniladi?
 20. Magnetik va nomagnetik yarimo`tkazgichlarning zona strukturalari qanday farq qiladi? Bu farqlar qanday effektlarga olib keladi?

X. Tartiblanmagan moddalarning yarimo`tkazgich xususiyatlari

1. Strukturada yaqin va uzoq tartib deb nimaga aytiladi?
2. Qanday moddalar tartiblanmagan moddalarga tegishli?
3. Tartiblanmagan moddalar turlarini ayting?
4. Kuchli va kuchsiz legirlangan (kirishmali) yarimo`tkazgichlarning shartlarini mohiyati nimada?
5. Holat zichligi bog`lanishida "dumlar" nima?
6. "Gofirlangan (qat-qat burmalangan) zonalar" nima?
7. Kirishmalarning tasodifiy taqsimotida potensial chuqurlik va "bukri"larning fizik mohiyati nimadan iborat?
8. Kuchli legirlangan va kuchli kompensirlangan yarimo`tkazgichlarda aralashma (kirishma) potensialini flukuatsiyasi qanday qilib paydo bo`ladi?
9. Qanday fizik hodisalarda kirishma potensialini flukuatsiyasi o`rinli bo`ladi (ahamiyatga molik bo`ladi) ?
10. Amorf yarimo`tkazgichlarning kuchli legirlangan kristal yarimo`tkazgichlarga o`xshashligi nimada va nimalari bilan farq qiladi?
11. Flukuatsion sathlar deb nimaga aytiladi?
12. Mott o`tishi nima?
13. Amorf yarimo`tkazgichlarda vodorod qanday rol o`ynaydi?
14. Suyuq, eritilgan yarimo`tkazgichlarda yarimo`tkazgich xossalarning tabiati qanday?
15. Shishasimon yarimo`tkazgichlarda yarimo`tkazgich xossalarning tabiati qanday?

XI. Yarimo`tkazgichlarning asosiy parametrlarini o`lchash metodlari

1. Yarimo`tkazgichlarning qanday parametrlari fundamental parametrlar deyiladi?
2. Yarimo`tkazgichlarning qanday parametrlari xarakteristik (tavsifiy) parametrlar deyiladi?
3. Ishlab chiqarilgan yarimo`tkazgich materiallarning pasportida qanday ko`rsatkichlar aks ettiriladi?
4. Solishtirma qarshilikni o`lchashning to`rt zondli usulining tamoyili nimadan iborat?
5. To`rt zondli usul bilan solishtirma qarshilik o`lchaganda qirra (chegara) effekti qanday qilib hisobga olinadi?
6. Solishtirma qarshilik zond usulida o`lchanganda zondlar qanday materiallardan tayyorlanadi?
7. To`rt zondli usulning eng katta xatoligi nima bilan aniqlanadi?

8. Van-der-Pauve metodining mohiyati nimada?
9. Ikki zondli usulning eng katta xatoligi nima bilan aniqlanadi?
10. Ikki zondli solishtirma qarshilikni o'lchash usulining mohiyati nimadan iborat?
11. Harakatlanuvchi zond usuli qanday maqsadlarda qo'llaniladi?
12. Kontaktsiz solishtirma qarshilikni o'lchash usulining mohiyati nimada?
13. Kontaktsiz solishtirma qarshilikni o'lchash usulining eng katta xatoligi nima bilan aniqlanadi?
14. Xoll effektining mohiyati nimada? Elektronlar va kovaklar qanday oqadi?
15. Xoll effektini o'lchashda qanday ma'lumotlar olinadi?
16. Xoll koeffitsiyentini aniqlashda parazit EYuK qanday bartaraf etiladi?
17. Xoll koeffitsiyentini to'g'ri o'lchash uchun namunaga qanday talablar qo'yiladi?
18. A^{IV} va $A^{III} B^V$ turdagi yarimo'tkazgichlarda donorlar va akseptorlar konsentratsiyasini alohida aniqlash tamoyili nimadan iborat?
19. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini aniqlashda o'tkazuvchanlikni modulyasiyalash usulining tamoyili nimadan iborat?
20. Fotoo'tkazuvchanlikning so'nish usulining mohiyati nimada?
21. Qanday hollarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti fazali usul orqali aniqlanadi va uning tamoyili nimadan iborat?
22. Germaniydagi zaryad tashuvchilarning diffuzion uzunligi bevosita qanday aniqlanadi?
23. Statsionar fotoo'tkazuvchanlik metodi va FEM-effektlarning tamoyilini tushuntiring?
24. Yarimo'tkazgichli moddalarning optik xususiyatlarini o'rganishda qanday yorug'lik manbalari va yorug'lik qabul qilgichlari qo'llaniladi?
25. Quyidagilarni aniqlash uchun qanday eksperimentlar o'tkazilishi kerak?
 - A). Zaryad tashuvchilarning sochilish mexanizmi,
 - B). Elektroniarning effektiv massasi,
 - C). Ruxsat etilmagan (taqiqlangan) zona kengligi,
 - D). Yarimo'tkazgich moddaning tozaligi.

XII. Epitaksial pardalarning parametrlarini o'lchash usullari

1. Epitaksial qatlam qalinligini o'lchash uchun qanday usullar qo'llaniladi?
2. Yupqa qatlamlarning qalinligini o'lchashning interferension usulining mohiyati nimada?
3. Epitaksial qatlamning solishtirma qarshiligini zondlar usuli bilan aniqlash mumkinmi?
4. Elipsiometriya usulining mohiyati nimadan iborat?
5. Qanday qilib sirqish usuli bilan solishtirma qarshilikni o'lchash mumkin?

6. Sig'implar usuli bilan yarimo'tkazgichlarning xususiyatlari haqida qanday ma'lumotlar olish mumkin?
7. Kirishmali sathlarni sig'im spektroskopiyasi qanday amalga oshiriladi?
8. Bir jinsli bo'lmalikni elektron - zond usulida tadqiqot qilishning mohiyati nimada?
9. Ion mikroanalizi qanday amalga oshiriladi?
10. LRSA (lokal rentgenostruktura analizi), MKLA (mikrokatodolyuminescent analiz), IMA (ion mikro analiz) usullarining sezgirliigi va o'lchash xatoliklari qanday?

XIII. Yarimo'tkazgichli radio va elektr asboblari

1. Yarimo'tkazgich materiallarning qo'llanilish sohalarini qanday klassifikatsiyalash mumkin?
2. Kuchli yarimo'tkazgichli diodlar qanday maqsadlarga mo'ljallangan?
3. Boshqariluvchi yarimo'tkazgichli diodlarning strukturasi, voltamper xarakteristikasi va uning ishlash tamoyili qanday?
4. Kuchli yarimo'tkazgichli diodlarni tayyorlash uchun qanday yarimo'tkazgichli materiallar ishlatiladi?
5. Stabilitronning ishlash tamoyilini tushuntiring.
6. Stabilitronning sifati qanday parametrlar orqali tavsiflanadi?
7. Stabilitron ishlab chiqarilishi uchun qanday yarimo'tkazgich materiallar ishlatiladi?
8. Impulsli diodlarni tayyorlash uchun qanday yarimo'tkazgichli materiallar ishlatiladi?
9. Yuqori chastotali detektorlarni tayyorlash uchun qanday yarimo'tkazgichli materiallar ishlatiladi?
10. p-n-o'tishning sig'imi nimalarga bog'liq?
11. Varikapning ishlashi p-n-o'tishning qaysi xossasiga asoslangan?
12. Varikap qanday materiallardan tayyorlanadi?
13. Tunnel diodning ishlash tamoyilini tushuntiring.
14. Tunnel diodlarga qo'yilgan talablar qaysi yarimo'tkazgich materiallarni ishlatish asosida amalga oshiriladi?
15. Tranzistorning ishlash tamoyilini tushuntiring.
16. Tranzistorlarni ishlab chiqarish uchun (tayyorlash uchun) qanday yarimo'tkazgich materiallar ishlatiladi?
17. Zaryad bog'lanishning tamoyili nimadan iborat?
18. Integral sxemalar deb nimaga aytiladi?

XIV. p-n- o'tishli foto va termoelektrik asboblari

1. Yarimo'tkazgichli fotoelementning ishlash tamoyilini tushuntiring.

2. Qanday kattaliklar fotoelementlarning asosiy xarakteristikalari bo'lib hisoblanadi?
3. Quyosh batareyalari qanday materiallardan yasaladi?
4. Fotoqarshilikning ishlashi qanday fizik hodisaga asoslangan?
5. Fotodiod va quyosh batareyasining ishlash tamoyillari nima bilan farq qiladi.
6. Yadro zarrachalarini qayd qilishni p-n o'tishning qanday strukturasi amalga oshiradi?
7. Yadro zarrachalarining detektorlari qanday materiallardan yasaladi?
8. Yarimo'tkazgichli yorug'lik manbai va lazerlarning ishlash tamoyili nimalardan iborat?
9. Yarimo'tkazgichli yorug'lik manbalarini tayyorlash uchun qanday yarimo'tkazgich materiallar istiqbolli hisoblanadi?

XV. p-n- o'tishsiz foto va termoelektrik asboblari

1. Termoelektrik asboblarda ishlatiladigan yarimo'tkazgich materiallarning aslligi qanday fizik kattaliklar bilan aniqlanadi?
2. Termoelektrik asboblari ishlab chiqarishda qanday yarimo'tkazgich materiallar eng yaroqli deb ataladi?
3. Yarimo'tkazgichli tenzometring ishlash tamoyili qanday fizik hodisaga asoslangan?
4. Yarimo'tkazgichli tenzometrlarning ishlab chiqarishga qanday materiallar yaroqli?
5. Xoll datchigining sezgirligi deb nimaga aytiladi va uni yarimo'tkazgich materialning qaysi xossalari belgilaydi?
6. Xoll datchigi qanday materiallardan tayyorlanadi?

XVI. Mikroelektronika va integral sxemalar

1. Zamonaviy fan va texnikada mikroelektronikaning o'rni.
2. Yarimo'tkazgichli, pardali, gidrid va jamlangan mikrosxemalar va ularning tuzilishi.
3. Integral mikrosxemalar tavsifnomalari va parametrlari.
4. Yarimo'tkazgich va pardali mikrosxemalar tayyorlash texnologiyasining xususiyatlari.
5. Yarimo'tkazgichlar va dielektrik materiallarning yupqa qatlamlarini olish metodlari.
6. n-p-n turdagi integral tranzistorlar.
7. p-n-p turdagi integral tranzistorlar.
8. Integral rezistorlar va kondensatorlar turlari va ularning ishchi tavsifnomalari.
9. Integral mikrosxemalar komponentlarini izolyasiyalash metodlari.
10. Raqamli va analogli mikrosxemalar.

11. Tranzistor kalitlar. Tranzistor kalitlarning turlari.
12. Triggerlar va ularning turlari.
13. Kuchaytirgich kaskadlar. Kuchaytirgich kaskadlar ish maromlari va ishchi tavsifnomalarini hisoblash.
14. Biquotbiy va maydonli tranzistorlarda kuchaytirgich kaskadlar.
15. Emitter takrorlagichlar.
16. Differensial kuchaytirgichlar.
17. Operasion kuchaytirgichlar va ularning asosiy parametrlari.
18. Mantiqiy elementlar va ularning ishlash tamoyillari.
19. Mantiqiy elementlarni qo'llash.
20. Doimiy xotirlovchi qurilmalar. Asosiy parametrlar va tavsifnomalar.
21. Operativ xotirlovchi qurilmalar.
22. Katta integral mikrosxemalar.
23. Mikrominiaturlashning fizik cheklavlari.
24. Zaryad aloqali asboblarning ishlashning fizik asoslari.
25. Zaryad aloqali asboblarning rivojlanish istiqbollari.

XVII. Ko'p qatlamli yarimo'tkazgich strukturalar

1. Ko'p qatlamli yarimo'tkazgich strukturalar va ularning turlari.
2. Metall-yarimo'tkazgich-metall strukturalar. Metall-yarimo'tkazgich-metall strukturalarning voltamper tavsifnomalari.
3. Metall-yarimo'tkazgich-metall strukturalarning sig'imi xossalari.
4. Metall-yarimo'tkazgich-metall strukturalariga temperaturaning ta'siri.
5. Metall-yarimo'tkazgich-metall strukturalarning optik xossalari.
6. Metall-yarimo'tkazgich-yarimo'tkazgich strukturalar. Metall-yarimo'tkazgich-yarimo'tkazgich strukturalar voltamper tavsifnomasi.
7. Metall-yarimo'tkazgich-yarimo'tkazgich strukturalarning sig'imi xossalari.
8. p-i-p, n-i-n, p-i-n va n-i-p strukturalar.
9. p-i-n va n-i-p strukturalarning optik xossalari.
10. Dielektrik qatlamli triod strukturalarning ishlash prinsiplari.
11. Dielektrik qatlamli triod strukturalarning qo'llanish sohalari.
12. Dielektrik qatlamli triod strukturalarning energetik zonaviy diagrammalari.
13. To'rt qatlamli strukturalarning ishlash prinsiplari va ularning asosiy tavsifnomalari.
14. To'rt qatlamli strukturalarning turlari.
15. To'rt qatlamli strukturalarning VAX hisobi.
16. Ko'p qatlamli ko'chish datchiklari.
17. Ko'p qatlamli namlik datchiklari.
18. Ko'p qatlamli yoritish va bosim datchiklari.
19. Ko'p qatlamli ionlovchi nurlanish datchiklari.
20. Ko'p qatlamli temperatura datchiklari.

XVIII. Yarimo`tkazgichlar asosidagi quyosh elementlari va batareyalari

1.

1. Qanday energiya manbalari mavjud?
2. Qayta tiklanuvchi energiya turlariga qanday energiyalar kiradi?
3. Qaysi turdagi energiyalar qayta tiklanmaydiganlariga kiradi?
4. Quyosh energiyasini qaysi ko`rinishdagi energiyalarga effektiv aylantirish mumkin?
5. Quyosh nurlanishi asosida nima yotadi?
6. Quyosh nurlanishi deb qanday nurlanishga aytadi?
7. Qanday nurlanishlar to`liq Quyosh nurlanishi deyiladi?
8. Quyosh nurlanishining tarkibiy qismlari.
9. Quyosh elementini tayyorlashda yarimo`tkazgichning qaysi parametrlari asosiy hisoblanadi?
10. Quyosh elementining ishlash fizikaviy tamoyili.
11. Quyosh elementining asosiy parametrlari.
12. Ko`p qatlamli Quyosh elementlaridagi yo`qotish turlari.
13. Quyosh nurlanishining imitatorlari va ularning funksiyasi.
14. Ochiq kosmosda ishlatiladigan fotoelektrik batareyalarga qo`yiladigan asosiy talablar.
15. Quyosh elementining F. I. K.
16. Quyosh elementining radiasion chidamliligi?
17. Quyosh elementi voltamper xarakteristikasining ifodasi.
18. Metall-yarimo`tkazgichdagi potesial bar`erning tabiati.
19. Metall-yarimo`tkazgichning ideal kontakti uchun voltamper xarakteristika ifodasi.
20. Quyosh elementi qarshiligini shuntlash va unig yuzaga kelish sababi.
21. Metall-yarimo`tkazgich kontakti orqali tok o`tish mexanizmi.
22. Metall-yarimo`tkazgich kontakti elektr maydoni va maydon potensialining taqsimlanishi.
23. Metall-yarimo`tkazgich kontakti VAX si.
24. Fotoelektrik batareyalarning asosiy parametrlari.
25. Quyosh elementlari xarakteristikalariga temperaturaning ta`siri.

2.

1. Quyosh elementlari tayyorlashda ishlatiladigan materiallarning yuzasi mikrorelefini analiz qilish usullari.
2. Yupqa qatlamli quyosh elementlarining afzalligi va ularni kamchiligi
3. Yarimo`tkazgichlarda yorug`lik yutilishining tabiati.
4. Yarimo`tkazgichlarda yorug`likning xususiy va aralashmali yutilishi.
5. Ceteroo`tish asosidagi quyosh elementlari.
6. Kaskadli quyosh elementlari.
7. Aralashmali va xususiy yarimo`tkazgichlar.
8. Kristalarda yorug`likning yutilish mexanizmi.
9. Yutilishning spektrli xarakteristikalari.
11. Dember samarasi.

12. Fotogalvanik effekt.
 13. Geteroo`tishli quyosh elementlarining afzalligi va kamchiligi.
 14. Yarimo`tkazgichlardagi nuqsonlarning quyosh elementini tavsifiga ta`siri.
 15. Quyosh elementining asosiy xarakteristikasi (VAX)
 16. Yarimo`tkazgichning xususiy fotoo`tkazuvchanligi.
 17. Fotorezistorlar, fotodiodlar.
 18. Erkin zaryad tashuvchilar tomonidan optik nurlanishning yutilishi.
 19. Yarimo`tkazgichlardagi fotoelektrik effektlar.
 20. Zonalararo to`g`ri va teskari optik o`tishlar.
 21. Yarimo`tkazgichlarning issiqlik sig`imi va issiqlik o`tkazuvchanligi.
 22. Quyosh elementlari uchun FIK tushunchasi.
 23. Yarimo`tkazgichlardagi radiasion defektlar.
 24. Elektron-kovakli o`tishning olish metodlari.
- 3.
1. p-n o`tish elektr xarakteristikasiga yuzaning ta`siri.
 2. Fotografiya to`g`risida asosiy tushunchalar.
 3. p-n o`tishlar planar konstruksiyalarining quyosh elementlarida ishlatilishi.
 4. Kvant chiqishi va yog`ish koeffitsiyenti.
 5. Quyosh elementlarining shuntlovchi va ketma-ket qarshiliklari.
 6. Quyosh elementlarining planar konstruksiyalari.
 7. Optik va rekombinasion yo`qotishlar mexanizmi.
 8. Quyosh elementlari konstruksiyalarini optimallashtirishda kerak bo`ladigan xususiyatlar.
 9. Yuqori samarali zamonaviy quyosh elementlari.
 10. Vertikal p-n o`tishli Quyosh elementlari.
 11. Ikki tomonlama sezgirlikka ega bo`lgan Quyosh elementlari.
 12. Yupqa kremniy asosidagi Quyosh elementlari.
 13. MDYa, MOYa, YAOYa-strukturali quyosh elementlari.
 14. Amorf kremniy asosidagi yupqa qatlamli quyosh elementlari.
 15. Issiqlik hosil qiluvchi Quyosh elementlari.
 16. Quyosh elementlari FIK ni oshirish usullari.
 17. Erda joylashtiriladigan Quyosh elementlari va fotoelektrik stansiyalar.
 18. Elektr energiyasini saqlash usullari.
 19. Yarimo`tkazgichlar fotosezgir parametrlarini o`lchash usullari.
 20. Quyosh elementi yarimo`tkazgichdagi o`tkazuvchanlik turini aniqlashda ishlatiladigan termozond usuli asosida yotuvchi fizik hodisa.
 21. Solishtirma qarshilikni o`lchashda ishlatiladigan to`rt zondli usulni qo`llashda namunaga qo`yiladigan talablar.
 22. Dielektrikdagi dielektriklar yo`qotishlar, ularning turi va ularni aniqlash usullari.
 23. Yarimo`tkazgich namunasining yuzasi reliefini analiz qilish usullari.
 24. Yarimo`tkazgichlar materiallari yuzasi himoyaviy tarkibini analiz qilish usullari.
 25. Yarimo`tkazgich materiallar yuzasini atomlar strukturasiini analiz qilish usullari.

Мундарижа

1 - QIYINLIK DARAJADAGI MASALALAR.....	
2 - QIYINLIK DARAJADAGI MASALALAR.....	
3 - QIYINLIK DARAJADAGI MASALALAR.....	
4 - QIYINLIK DARAJADAGI MASALALAR.....	
1. Yarimo`tkazgichlardagi elektronlar va kovaklar statistikasi.....	
2. Yarimo`tkazgichlardagi zaryad tashuvchilar rekombinasiyasi.....	
3. Zaryad tashuvchilarning diffuziyasi va dreyfi.....	
4. Magnit maydonda zaryad tashuvchilarning diffuziyasi va dreyfi.	
5. Sirtiy hodisalar.....	
6. Yarimo`tkazgichdagi termo elektr yurituvchi kuch (EYuK)	
7. Yarimo`tkazgichlarda foto EYuK	
MASALALARNING JAVOBLARI VA YECHIMLARI	
1 - qiyinlik darajadagi masalalarning javoblari	
2 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari	
3 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari	
4 - daraja qiyinlikdagi masalalarning javoblari	
NAZORAT SAVOLLARI:	

К.А. Tursunmetov, U.Q.Valiyev, Н. Yu. Mavlyanov, I.X. Xamidjonov

YARIMO`TKAZGICHLAR FIZIKASIDAN MASALALAR VA SAVOLLAR TO`PLAMI (O`quv qo`llanma)

15.05.2012 йилда теришга берилди. 24.12.2012 йилда босишга рухсат этилди. Бичими 60×84, 1/16. Хажми 7,0 босма табоқ.
Адади 500 дона. Буюртма 56. Баҳоси келишилган нарҳда.

“Фахризола” КТКК. Дўстлик шох кўчаси, 2 “А” уй,
Наманган шаҳри.



ISBN 978-9943-328-85-3



9 789943 328853