

NAZAROW NURÝAGDY, TUJANOWA IRINA NIÝAZOWNA

GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY

meseleler ýygyny



Aşgabat – 2010

TÜRKMENISTANYŇ BILIM MINISTRRLIGI

Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersiteti

NAZAROW NURÝAGDY, TUJANOWA IRINA NIÝAZOWNA

GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY

meseleler ýyggyndysy

Ýokary okuw mekdepleriniň talypalary üçin okuw gollanmasy

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan makullanyldy

Aşgabat – 2010

BBK 22.37
N 41
UOK 539.2

N. Nazarow, I.N. Tujanowa
GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY meseleler ýygynyndysy
Okuw gollanmasy

Okuw gollanmasynda gaty jisimiň elektronikasy, ýarymgeçiriji abzallaryň fizikasy we mikoelektronika derslerinde owrenilýän temalar boýunça meseleleri çözmeklik üçin zerur bolan esasy düşüňjeler, formulalar, aňlatmalar, mesele çözmekligiň mysallary we meseleler toplumy getirilen. Bu meseleler ýygynyndysy şu esasy bölümlerini öz içine alýar: gaty jisimleriniň zona teoriýasy, ýarymgeçirijilerde zarýad geçirijileriniň statistikasy, kinetiki hadysalar, gaty jisimlerde sepleşik (kontakt) hadysalary, p-n we m-s-geçişleriň hem-de MDÝ-strukturalaryň esasy häsiýetnamalary, üst we optoelektron hadysalary.

Gollanma şu gününň ösen talabyna doly gabat gelýär hem-de ýokary okuw mekdepleriniň fizika, radiofizika we elektronika, awtomatika, mikroelektronika, aragatnaşyk enjamlary we häzirki zaman aragatnaşyk tehnologiýasy, kompýuter-maglumat tehnikasy, energetika ugurlary boýunça bilim alýan talyplar, aspirantlar we hünärmenler üçin örän peýdaly bolar.

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan makullanyldy.

BBK 22.37
UOK 539.2

GIRIŞ

Gaty jisimiň elektronikasy iň bir çalt depgin bilen ösýän ylmy ugurlaryň biri bolup, soňky 40-50 ýylyň içinde görülip-eşidilmedik derejede ösdi, özgerdi. 1960 ýyllarda gaty jisimler elektronikasynyň esasyňy kremniý, germaniý we beýleki ýönekeý ýarymgeçirijiler, olaryň esasynda taýýarlanylýan bipolar tranzistorlar, diodlar düzen bolsa, häzirki wagtda gaty jisimler elektronikasynyň esasynda ýönekeý ýarymgeçirijiler bilen bir hatarda dürli ýarymgeçiriji birleşmeleri, örän çylşyrymly uly integral mikroshemalary, dürli opoelektron gurluşlary we olaryň taýýarlanyşynyň ygtybarly tehnologiýasy dürýär.

Gaty jisimler elektronikasy – häzirki zaman elektronikasynyň düýpbiniňyady bolup, ýarymgeçirijileriň göwrümünde bolup geýýän elektron hadysalary, olaryň fiziki häsiýetlerini, ýarymgeçiriji, ýarymgeçiriji-metal, ýarymgeçiriji-dielektrik(okis)-metal strukturalaryň gatlaklarynyň arasyndaky elektron (n) - deşikli (p) we metal (m) – ýarymgeçiriji (ý) geçişleriň häsiýetnamalaryny, olaryň esasynda taýýarlanylýan abzallaryň işleýiş prinsipini, taýýarlanylş tehnologiýasyny öwrenýär.

Özleriniň udel elektrik geçirijiliginiň ululygy boýunça jisimleri üç topara bölmek mümkin: metallar, dielektrikler we ýarymgeçirijiler.

Metallar iň ýokary elektrik geçirijilige eýedir. Arassa metallaryň udel garşylygy örän kiçi bolup 10^{-8} - 10^{-7} Om'm töweregidir. Garyndyly metallaryň udel garşylygy 10^{-7} - 10^{-6} Om'm çenli artýar. Metallarda elektrik geçirijiligi emele getirýan erkin elektronlaryň sany $n = 10^{22}$ sm⁻³ barabar bolup, olaryň sany känbir temperatura bagly däldir. Temperaturanyň artmagy bilen metallaryň udel garşylygy temperatura proporsional artýar.

Adaty dielektrikler otag temperaturasynda, böwsülme elektrik meýdanyndan kiçi meýdanda, izolýatordyr. Olaryň udel garşylygy metallaryň udel garşylygyna seredende 15-25 dereje ýokary bolup, takmyndan 10^8 - 10^{17} Om'm. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ionlaryň hereket edijiliginiň (podwiznostynyň) artmagynyň netijesinde dielektrikleriň udel garşylygy azalýar.

Ýarymgeçirijiler udel elektrik geçirijiligi boýunça metallar bilen dielektrikleriň arasynda aralyk ýeri eýeläp, olaryň udel garşylygy 10^{-6} – 10^8 Om'm aralykda üýtgeýär.

Ýöne ýarymgeçirijileri häsiýetlendirýän esasy fiziki häsiýetler, diňe bir, olaryň udel elektrik garşylygy dälde, eýsem olaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylykda örän çalt üýtgemek tebigatydyr: O K temperaturada hususy (arassa) ýarymgeçirijiler dielektriklere meňzeş izolýatordyr. Bu bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasynyň nola deňdigini görkezýär. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ýarymgeçirijilerde erkin zarýdlar oýandyrylyp (generirlenip) olaryň konsentrasiýasy eksponenta boýunça artýar, emma metallarda bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasy temperatura baglylykda kän bir üýtgemeyär.

Ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasynyň artmagy, olaryň udel garşylygynyň eksponenta boýunça kemelmegine, ýagny udel elektrik geçirijiliginiň artmagyna alyp gelýär. Belli boluşy ýaly, onuň tersine, ýokary udel elektrik geçirijiligi bolan metallarda, temperaturanyň artmagy bilen udel garşylyk artýar.

Häzirki wagtda örän ýuka ýarymgeçiriji epitaksial gatlaklaryny döretmeklige mümkinçilik berýän epitaksial tehnologiýanyň dürli görnüşleriniň kämilleşmegi, fotolitografiýa we elektron litografiýasy usullarynyň ösmegi, integral mikroelektronikasyň, optoelektronikanyň, funksional elektronikanyň uly depgin bilen ösmegine getirdi. Bu bolsa öz gezeginde submikron tehnologiýasynyň döremegine esas boldy hem-de mikroelektronikanyň, nanoelektronikanyň ösmegine we nanoölçegli mikroprosessor tehnikasynyň döremegine getirdi.

Gaty jisimiň elektronikasy dersi boýunça talyplaryň teoriýa taýdan alan düýpli bilimini berkitmek we olaryň alan bilimlerini dürli ylmy-amaly, tehniki-tehnologiki meseleleri çözmekde ýerlikli peýdalanmak ukubyny kämilleşdirmek işinde gaty jisimiň elektronikasy boýunça meseleler ýygynyndysynyň ähmiýeti uly bolar.

1. KWANT MEHANIKAŞYNYŇ ÜLÜŞLERI

1.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Kwant mehanikasyň esasy postulatlary.
2. Şredengeriň umumy deňlemesi.
3. Mikrobölejigiň potensial päsgelçilikden geçişi.

1.2. MESELE ÇÖZMEKLIK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

1. Kwant mehanikasyň esasy postulatlary:

1-nji postulat.

Eger tolokun funksiýasy $\psi(q)$ belli bolsa, onda mikrobölejigiň (ýa-da mikrobölejikler sistemasynyň) ýagdaýy berlendir.

Kwant mehanikasynda umumy sistemanyň ýagdaýy, modulynyň kwadraty koordinatalaryň ähtimallyk bahasynyň paýlanyşyny kesgitleýän, koordinatalar funksiýasy $\Psi(q)$ bilen ýazylyp bilner:

$$|\Psi(q)|^2 dq$$

- aňlatma, sistemada geçirilen ölçegleriň, göwrümiň dq uluşünde koordinatalaryň bahalaryny ýüze çykarmagyň ähtimallygydyr.

$\Psi(q)$ - funksiýa sistemanyň tolkun funksiýasy diýlip atlandyrylýar. Tolkun funksiýasy birnäçe talaplary ödemelidir:

- a) Ol üznüksiz bolmalydyr;
- b) Ol birbahaly, birgörnüşli (однозначной) bolmalydyr;
- w) Onuň kwadraty integrirlenýän bolmalydyr, ýagny $\int |\Psi(q)|^2 dq$ integral bolmalydyr.
- g) Ol normirlenen bolmalydyr, ýagny bu integral bire deň bolmalydyr.

Soňky tassyklamanyň fiziki manysy örän ýönekeý we aýdyňdyr: koordinatalaryň ähli mümkin bolan bahalarynyň ähtimallyklarynyň jemi bire deň, sebäbi giňişligiň islendik nokadynda obektiň ýüze çykarylmany – anyk, şübhesiz hadysadyr.

2-nji postulat.

Tolkun funksiýalary superpozisiýa (vektorlaryň goşulyşy) prinsipine boýun egýärler: eger tolkun funksiýasynyň $\psi_1(q)$ ýagdaýynda käbir ölçegler X_1 baha getirse, emma tolkun funksiýasynyň $\psi_2(q)$ ýagdaýynda X_2 baha getirse, onda islendik $\psi = c_1\psi_1(q) + c_2\psi_2(q)$ görnüşdäki funksiýa şeýle ýagdaýy ýazyp düşündürýär, ýagny ölçeg nrtijeleri bolan X_1 ýa-da X_2 netijäni berýär.

3-nji postulat Şredengeriň doly deňlemesiniň hususy çözgüdini funksiýanyň superpozisiýasy görnüşinde göz önüne getirip bolar:

Kwant mehanikasynda islendik fiziki ululyga \hat{L} çyzykly öz-özüne utgaşdyrylan (самосопреженный) operator deňeşdirilen. Bu fiziki ululygyň eýe bolup biljek, mümkin bolan ýeketäk bahasy, operator deňlemesiniň $\hat{L} \Psi = l \Psi$ hususy bahasy l bolup durýar.

2. Şredengeriň umumy deňlemesi:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U \Psi ,$$

bu ýerde $\Psi(x, y, z, t)$ – mikrobölejigiň tolkun funksiýasy; m – mikrobölejigiň massasy; Δ – Laplasyň operatory $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; $U(x, y, z, t)$ – mikrobölejigiň hereket edýän meýdanynyň potensial energiýasy.

3. Durnukly (stasionar) ýagdaý üçin Şredengeriň deňlemesi:

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0,$$

bu ýerde $\psi(x, y, z)$ – tolkun funksiýasynyň amplitudasy; E – mikrobölejigiň doly energiýasy; U – mikrobölejigiň potensial energiýasy.

Şredengeriň deňlemesiniň fiziki kabul edilen çözüdini kanagatlandyryň standart şertler: funksiýanyň gutarnyklylygy, üznüksizligi we birgörnüşliligi; funksiýanyň koordinatalar boýunça önüminiň üznüksizligi.

Ψ funksiýa üçin normirowka şerti:

$$\int_V |\psi|^2 dx = 1$$

4. Mikrobölejigiň potensial päsgelçilikden geçmeginiň ähtimallygy - “durulyk” koeffisiýenti:

$$D = \exp \left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx \right),$$

bu ýerde x_1 we x_2 – mikrobölejigiň potensial energiýasynyň U doly energiýasyndan E ulu bolýan aralagynyň nokatlarynyň koordinatalary.

Ýene-de “durulyk” koeffisiýenti aşakdaky formula bilen hasaplanylýp bilner:

$$D = 1 - \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2,$$

bu ýerde A_1 – potensial päsgelçilige gelip düşýän tolkunynyň amplitudasy, A_2 – potensial päsgelçilikden yzyna serpikýän tolkunynyň amplitudasy.

1.3. MESELE ÇÖZMEGIŇ MYSALLARY

1-nji mesele.

Serpilme \hat{I} , süýşme \hat{T}_a , kompleksleýin gatnaşyklylyk \hat{K} operatorlary gatnaşyklar bilen kesgitlelen: $\hat{I}\psi(x) = \psi(-x)$, $\hat{T}_a\psi(x) = \psi(x + a)$, $\hat{K}\psi(x) = \psi^*(x)$. Bu operatorlar çyzyklymy? Bu operatorlara ters operatorlary tapyň.

Çözülüşi

Operatorlara seredeliň:

$$\hat{I}(\alpha\psi(x)) = \alpha\hat{I}\psi(x)$$

we

$$\hat{T}_a\beta\psi(x) = \beta\hat{T}_a\psi(x)$$

Onda, deňliklerden grnüş i ýaly serpilme we süýşme operatorlary çyzyklydyrlar. Kompleksleýin gatnaşyklylyk operatory – çyzykli däl, sebäbi:

$$\hat{K}(c\psi(x)) = c * \hat{K}\psi(x),$$

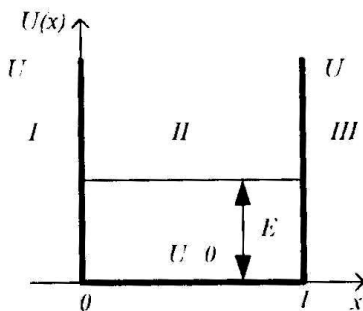
bu ýerde $c = \text{const.}$

Bu operatorlara ters operatorlar:

$$\hat{I}^{-1} = \hat{I}; \quad \hat{T}_a^{-1} = \hat{T}_{-a}; \quad \hat{K}^{-1} = \hat{K}$$

2-nji mesele.

Tükeniksiz beýik diwarlary we l ini bolan gönüburçly potensial çukury berlen bolsun (1.1. surat). Bu potensial çukurda ýerleşen mikrobölejigiň tolkun funksiýasynyň görnüşini we energiýasyny kesgitläň.



Çözülüşi:

1.1. suratda görkezilen, potensial çukuryň içindäki we daşyndaky bölekleri üçin Şredengeriň deňlemesini ýazalyň:

I ı III uçastoklar üçin:

$$\frac{d^2\psi_{I,III}}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - U)\psi_{I,III} = 0 \quad (1.1)$$

1.1. surat

- II uçastok üçin:

$$\frac{d^2\psi_{II}}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}E\psi_{II} = 0 \quad (1.2)$$

Değişlilikde (1.1) we (1.2) deňlemelerde aňlatmalary girizeliň:

$$k_1 = \frac{2\pi}{h}\sqrt{2m(E - U)}$$

$$k = \frac{2\pi}{h}\sqrt{2mE}$$

Girizilen aňlatmalary hasaba alsan, (1.1) we (1.2) deňlemeleriň umumy çözügüdi şu görnüşe eýe bolýar:

$$\begin{aligned}\psi_{I,III} &= Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x} = Ae^{-ik_2x} + Be^{ik_2x} \\ \psi_{II} &= Ce^{ikx} + De^{-ikx}\end{aligned}\quad (1.3, 1.4)$$

(1.3) deňlikde $k_1 = ik_2$. A, B, C we D koeffisiýentleriň bahalaryny tapalyň.

Meseläniň şertine baglylykda $U \rightarrow \infty$, onda, bu ýerden $k_2 \rightarrow \infty$ bolýar. ψ_I funksiýanyň ahyrky bolup galmagy üçin, $B = 0$ bolmagy zerurdyr. Başga bir tarapdan, $x \rightarrow -\infty$ bolan ýagdaýynda ψ_I funksiýanyň ahyrky bolmagy üçin, $A = 0$ şertiň ýerine ýetmegi hem zerurdyr. Onda, I we III uçastoklarda $\psi_I(x) = \psi_{III}(x) = 0$. C we D koeffisiýentleri kesgitlemek üçin tolkun funksiýanyň üznüksizlik şertinden peýdalanyň ýazalyň:

$$\psi_I(0) = \psi_{III}(0) = 0$$

Alýarys $C + D = 0$ ýa-da $C = -D$. Alnan baglanşygy (1.4) deňlige goýup tapalyň:

$$\psi_{II} = C(e^{ikx} - e^{-ikx}) = C_1 \sin kx \quad (1.5),$$

Bu yerde, $C_1 = 2iC$.

Üznüksizlik şertinden potensial çukuryň sag gapdal üsti üçin:

$$\psi_{II}(l) = \psi_{III}(l) = 0$$

$$C_1 \sin kl = 0$$

Haçan-da $C_1 \neq 0$ bolanda, $kl = n\pi$, $n = 1, 2, \dots$ bahalarynda bu mümkin.

Onda k_n şu bahalara eýe bolup bilýär:

$$k_n = n \frac{\pi}{l}, n = 1, 2, \dots$$

k_n – iň bahasyny (1.5) goýup, ψ_{II} tolkun funksiýasyny ψ_n bilen aňladyp, onuň üçin aňlatmany alýarys:

$$\psi_n = C_n \sin\left(n \frac{\pi x}{l}\right)$$

Bu funksiýanyň normirowka şertinden C_n hemişeligi tapýarys:

$$C_n = \sqrt{\frac{2}{l}}$$

Şeýlelikde, potensial çukurdaky mikrobölejigiň tolkun funksiýasy şu görnüşe eýedir.

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(n \frac{\pi x}{l}\right)$$

Bu tolkun funksiya bilen aňladylyan energiýa derejesi, aňlatma bilen kesgitlenilýär:

$$E_n = \frac{h^2}{8ml^2} n^2$$

3-nji mesele. Birölçegli potensial päsgelçilik 1.2. suratda görkezilen görnüşe eýedir. Potensial päsgelçilige çep tarapyndan hereket edýän, massasy m we energiýasy E ($U_1 < E < U_0$) bolan mikrobölejik üçin bu potensial päsgelçiligiň durulyk (prozračnost) koeffisiýentini kesgitläň.

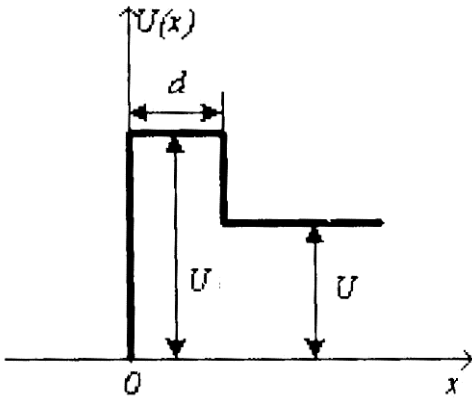
Çözülişi

Şredengeriň birölçegli amplituda deňligi şu görnüşde ýazylýar:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} = (E - U)\psi \quad (1.6)$$

Eger mikrobölejik potensial päsgelçiligiň çep tarapynda ýerleşen bolsa, onda $U = 0$ we (1.6) deňlik görnüşe eýe bolýar:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi$$



1.2. surat

Bu deňlemäniň umumy çözüdi aňlatma bilen tapylýar.

$$\psi_L = Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x}, \quad (1.7)$$

bu ýerde

$$k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

Merkezi böleginde ýerleşen mikrobölejik üçin $U = U_0$ we $U_0 > E$ bolar. Potensial päsgelçiligiň bu bölegi üçin Şredengeriň deňlemesiniň (1.6) degişli çözüdi şeýle görnüşde ýazylýar:

$$\psi_M = Ce^{k_2x} + De^{-k_2x}, \quad (1.8)$$

bu ýerde

$$k_2 = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$$

Surtda görkezilen potensial päsgelçiligin beýik basgançagyndan sagda ýerleşen mikrobölejik üçin, $U = U_1 < E$. Bu ýerde, biziň x okunuň položitel tarapyna ýaýraýan tolkuna seretýändigimiz sebäpli, (1.6) deňlemäniň çözügi aşakdaky görnüşde bolýar:

$$\psi_R = Fe^{ik_3x}, \quad (1.9)$$

bu ýerde

$$k_3 = \frac{\sqrt{2m(E - U_1)}}{\hbar}$$

Indi ψ_L , ψ_M we ψ_R funksiýalary kanagatlandyryp biljek şertleri ýazalyň:

$$Ae^{-\frac{ik_1d}{2}} + Be^{\frac{ik_1d}{2}} = Ce^{-\frac{k_2d}{2}} + De^{\frac{k_2d}{2}} \quad (1.10)$$

$$ik_1Ae^{-\frac{ik_1d}{2}} - ik_1Be^{\frac{ik_1d}{2}} = k_2Ce^{-\frac{k_2d}{2}} - k_2De^{\frac{k_2d}{2}} \quad (1.11)$$

$$Fe^{\frac{ik_3d}{2}} = Ce^{\frac{k_2d}{2}} + De^{-\frac{k_2d}{2}} \quad (1.12)$$

$$ik_3Fe^{\frac{ik_3d}{2}} = k_2Ce^{\frac{k_2d}{2}} - k_2De^{-\frac{k_2d}{2}} \quad (1.13)$$

(1.10) we (1.11) şertlerden alarys

$$2ik_1Ae^{-\frac{ik_1d}{2}} = (ik_1 + k_2)Ce^{-\frac{k_2d}{2}} + (ik_1 - k_2)De^{\frac{k_2d}{2}} \quad (1.14)$$

((1.12) we (1.13) şertlerden tapýarys:

$$(k_2 + ik_3)Fe^{\frac{ik_3d}{2}} = 2k_2Ce^{\frac{k_2d}{2}} \quad (1.15)$$

$$(k_2 - ik_3)Fe^{\frac{ik_3d}{2}} = 2k_2De^{-\frac{k_2d}{2}} \quad (1.16)$$

(1.14), (1.15) we (1.16) deňlemelerden C we D koeffisiýentleri aýryp tapýarys:

$$\frac{2ik_1Ae^{-\frac{ik_1d}{2}}}{Fe^{\frac{ik_3d}{2}}} = \frac{(ik_1 + k_2)e^{-k_2d}(k_2 + k_3)}{2k_3} + \frac{(ik_1 - k_2)e^{k_2d}(k_2 - k_3)}{2k_2}$$

Bu ýerden potensial päsgelçiligiň durulyk koeffisiýenti üçin indiki aňlatmany alýarys:

$$\frac{k_3|F|^2}{k_1|A|^2} = \frac{16k_1k_2^2k_3}{(k_2^2 - k_1k_3)^2(e^{-k_2d} - e^{k_2d}) + (k_1k_2 + k_2k_3)^2(e^{-k_2d} + e^{k_2d})^2} =$$

$$= \frac{\sqrt[4]{E(U_0 - E)}\sqrt{E - U_1}}{\left[(U_0 - E) - \sqrt{E(E - U_1)}\right]^2 sh^2 k_2 d + (U_0 - E)\left(\sqrt{E} - \sqrt{E - U_1}\right)^2 ch^2 k_2 d},$$

bu ýerde

$$sh(k_2 d) = \frac{e^{k_2 d} - e^{-k_2 d}}{2} - \text{giperbolik sinus,}$$

degişlilikde

$$ch(k_2 d) = \frac{e^{k_2 d} + e^{-k_2 d}}{2} - \text{giperbolik kosinus.}$$

1.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇİN MESELELER

1. Massasy m bolan mikrobölejigiň potensialy $U(x)$ bolan meýdanyndaky birölçepli hereketi, Şredengeriň deňagramlykdaky ýagdaý üçin deňlemesi bilen ýazylýar

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + U(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

$U(x) = U(-x)$ we çözülişi $\psi(x)$ wyrožden däl diýip hasap edip, $\psi(x)$ funksiýanyň belli jübütliginiň bardygyny subut ediň:

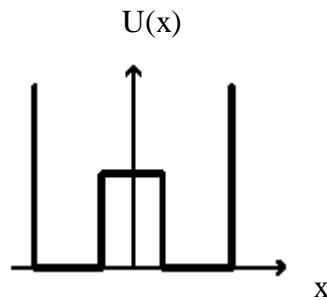
$$\psi(x) = +\psi(-x) - \text{jübüt funksiýa,}$$

ýa-da

$$\psi(x) = -\psi(-x) - \text{jübüt däl funksiýa.}$$

Şu gönükmeleri çözüň:

a) mikrobölejigiň hereketini 1.3. syratda görkezilen potensial meýdanda serediň. Bu potensial meýdanda mikrobölejigiň energiýasynyň iki sany iň kiçi hususy bahasyna degişli bolan durnukly ýagdaýy üçin Şredengeriň deňlemesiniň çözülişiniň takmyn görnüşini guruň. Alnan çözgütleri ψ_1 we ψ_2 bilen, olara degişli bolan energiýalary, E_1 we E_2 bilen belläň.



1.3. surat

b) Ýokarda getirilen potensial meýdany üçin Şredengeriň doly deňlemesiniň hususy çözgüdini funksiýanyň superpozisiýasy (wektorlaryň goşulyşy) görnüşinde göz öňüne getirip bolar:

$$\psi_1 e^{-i(E_1/\hbar)t} \quad \text{we} \quad \psi_2 e^{-i(E_2/\hbar)t}$$

Wagtyň $t = 0$ pursadynda, çepdäki potensial çukurda takmyndan doly toplanan tolkun toplumyny ψ alyň. Wagtyň geçmegi bilen tolkun toplumynyň hereketini ýazyp düşündiriň.

Jogaby: a) $\psi(x) = \sin k_1 (x+a)$ eger-de $-a < x < -b$
 $\psi(x) = \pm \sin k_1 (a-x)$ eger-de $b < x < a$
 $\psi(x) = \exp (-k_2 (b+x))$ eger-de $-b < x < 0$
 $\psi(x) = + (-) \exp (-k_2 (b-x))$ eger-de $0 < x < b$

$$k_1 = \frac{n\pi}{2a}, \quad k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mV_0 - k_1^2 \hbar^2}.$$

$$\text{b) } T = \frac{2\pi\hbar}{E_2 - E_1}$$

2. Klassiki teoriýa bilen kesgitlenilýän, v_f faza tizligi bilen hereket edýän erkin elektron üçin de Broýlyň tolkunynyň faza we toparlaýyn tizligi nähili?

Jogaby: $v_f = \frac{C^2}{v}, \quad v_t = v$

2. ÝARYMGEÇIRIJILERDE ELEKTRONLARYŇ WE DEŞIKLERIŇ STATISTIKASY

2.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Mikrobölejikleriň energiýa boýunça paýlanyş funksiýasy. Garyndyly we aşagaryndyly (wyroždennyý) ýarymgeçirijiler.
2. Ferminiň derejesi. Ferminiň derejesiniň hususy we garyndyly ýarymgeçirijilerde ýerleşşi.

2.2. MESELE ÇÖZMEKLIK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

1. Makswell - Bolsmanyň funksiýasy boýunça mikrobölejikleriň energiýa boýunça paýlanyşy.

$$f_{M-B}(E) = \exp\left(E_f - \frac{E}{kT}\right),$$

E – mikrobölejigiň energiýasy;
 E_f – Ferminiň energiýasy;
 k – Bolsmanyň energiýasy;
 T – temperatura.

2. Fermi – Diragyň funksiýasy boýunça mikrobölejikleriň energiýa boýunça paýlanyşy.

$$f_{F-D}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

3. Geçiş zonasynnda elektronlaryň konsentrasiýasy.

$$n = n(E) = \int_{E_c}^{E_{\max}} N(E) f(E) dE = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right),$$

bu ýerde $N(E) = N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$ - geçiş zonasynnda energetiki derejeleriň effektiw dykzlygy. E_c – geçiş zonasynnyň düýbüne degişli energiýa ($E_c=0$ bolanda); E_i – ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynnyň ortasyna degişli energiýa, E_g ($E_g = E_c - E_v$); m_n – elektronyň effektiw massasy; h – Plankyň hemişeligi n_i – ýarymgeçiriji hususy zarýad geçirijileriň konsentrasiýasy.

4. Walent zonasynnda deşikleriň konsentrasiýasy:

$$p = p(E) = \int_{-\infty}^{E_v} N(E) [1 - f(E)] dE = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right),$$

bu ýerde $N(E) = N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$ - walent zonasynnda energetiki derejeleriň effektiw dykzlygy; E_v – walent zonasynnyň depesine degişli energiýa, m_p – deşikleriň effektiw massasy.

5. Özara täsirleşýän massalaryň kanuny:

$$n_i^2 = np = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

6. Ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň temperatura we zaryad geçirijileriň konsentrasyýasyna baglylygy:

n-görnüşli:

$$E_{fn} = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$$

p-görnüşli:

$$E_{fp} = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$$

2.3. MESELE ÇÖZMEĞİŇ MYSALLARY

1-nji mesele. Otag (300 K) we suwuk awot (77 K) ramperaturalarynda kremniýde (Si) we arsenid galliýde (GaAs) hususy zaryad geçirijileriniň konsentrasyýalaryny hasaplaň.

Çözülişi

Geçiş zonasyna zaryadlaryň konsentrasyýasy formula bilen kesgitlenilýär:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

bu ýerde, N_c we N_v deňişlilikde geçiş we walent zonalarynda derejeleriň effektiv dykzlygy:

$$N_c = 2 \left(2\pi \frac{m_{dc}^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} M_c = 2,51 \cdot 10^{19} M_c \left(\frac{m_{dc}^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ sm}^{-3}.$$

Bu ýerde m_{dc}^* - energetik zonalaryň anizotroplygyny hasaba alýan effektiv massa.

Kremniý üçin (Si) $m_{dc}^* = 0,33m_0$, Arsenid galliý üçin (GaAs) $m_{dc}^* = 0,067 m_0$. M_c kremniý üçin 6, Arsenid galliý üçin 1 deňdir.

300 K temperaturada kremniý üçin alarys:

$$N_c = 2,51 \cdot 10^{19} \cdot 6(0,33)^{\frac{3}{2}} \approx 2,8 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

Deňişlilikde GaAs üçin:

$$N_c = 2,51 \cdot 10^{19} \cdot (0,067)^{\frac{3}{2}} \approx 4,7 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$$

Walent zonasyna derejeleriň effektiv dykzlygy N_v , geçiş zonasyna meňzeşlikde, m_{dc}^* derek

m_{dv}^* girizip alarys. Kremniý üçin $m_{dv}^* = 0,55 m_0$, arsenid galliý üçin $m_{dv}^* = 0,47m_0$.

Kremniý we arsenid galliý ýarymgeçirijileri üçin geçirilin hasaplamalaryň netijesi tablisada getirilen.

Ýarymgeçirijileriň gadagan zonasynyň giňligi E_g temperatura baglylykda haýal üýtgeýär, ýagny $E_g = E_{g0} - \alpha T$. E_{g0} we α ululyklaryň bahasy 2-nji goşundyda getirilen. Kremniý üçin:

$$N_i = 10^{19} \sqrt{2,8 \cdot 1,02} \cdot \exp\left(-\frac{1,8 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) \approx 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}.$$

Arsenid galliý üçin: $N_i \approx 1,1 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$.

Kremniý we arsenid galliý ýarymgeçirijileri üçin otag we suwuk azot temperaturalarda, geçiş we walent zonalarynda derejeleriň effektiv dykzlygynyň hasaby we hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy n_i tablisalarda getirilen:

Otag temperaturasynda (300 K):

	Si	GaAs
N_c, sm^{-3}	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$
N_v, sm^{-3}	$1,02 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$
N_i, sm^{-3}	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$

Suwuk azot temperaturasynda (77 K):

	Si	GaAs
N_c, sm^{-3}	$3,6 \cdot 10^{18}$	$5,8 \cdot 10^{16}$
N_v, sm^{-3}	$1,4 \cdot 10^{18}$	$9,8 \cdot 10^{17}$
N_i, sm^{-3}	$3 \cdot 10^{-20}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$

2-nji mesele. Otag ($T_1 = 300 \text{ K}$) we suwuk azot ($T_2 = 77 \text{ K}$) temperaturalarda kremniý Si we antimonid indiý InSb hususy ýarymgeçirijilerde gadagan zonanyň ortasyna görä Ferminiň derejesiniň f_0 göwrüm ýerleşişini hasaplaň (elektronlaryň we deşikleriň effektiv massalarynyň dürlüdigini hasaba almak bilen).

Çözülişi

Hususy ýarymgeçirijilerde $n_0 = p_0$ we ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň ortasyna görälikde Ferminiň derejesiniň f_0 ýerleşişini getirilen formulalary ulanyp hasaplamak mümkin:

$$f_{0i} = \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{3}{4} kT \cdot \ln \left(\frac{m_n^*}{m_p^*} \right),$$

$$N_{c,v} = 2 \left(2\pi \frac{m^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Hasaplamalaryň netijesinde alýarys:

T, K		300	77
f_0, eW	Si	-0,124	-0,0032
	InSb	0,074	0,019

Şeýlelikde, hususy ýarymgeçirijiler (E_i) bolan kremnide Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasyna görä aşakda, emma antimonid indiýde ýokarda ýerleşýär.

3-nji mesele. Suwuk azot temperaturasynda ($T = 77 \text{ K}$) we garyndylaryň konsentrasiýasy $N_{D,A} = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolanda n we p -görnüşli antimonid indiýniň gadagan zonasynyň ortasyna görälikde Ferminiň derejesiniň f_0 ýerleşişini hasaplaň.

Çözülişi

Garyndyly InSb ýarymgeçiriji birleşmasinde Ferminiň derejesiniň f_0 ýerleşişini şu formula bilen tapýarys:

$$f_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_0}{n_i} \right) = 0,085 \text{ eW}.$$

Ferminiň derejesiniň f_0 ýerleşişini gadagan zonanyň ortasyna görä tapmak üçin, hususy ýarymgeçirijide Ferminiň derejesiniň süýşmesini hasaba almaly (2-nji meselä seret): 0,019 eW. Değişlilikde, n -InSb-de $f_{0n} = 0,104 \text{ eW}$, u p -InSb-de $f_{0p} = 0,066 \text{ eW}$.

Eger Ferminiň derejesiniň ýerleşişini geçiş zonasynyň gyrasyna görä hasaplasaň, onda $E_g/2 - f_{0n} = 0,115 - 0,104 = 0,011 \text{ eW}$, onuň bahasy suwuk azot temperaturasynda ($T = 77 \text{ K}$) kT (0,013 eW) deňdir, bu bolsa n -InSb – aş a garyndylydygyny, emma p -InSb – aş a garyndyly daldigini görkezýär.

Aş a garyndyly ýarymgeçiriji (вырожденный полупроводник) - bu garyndylaryň konsentrasiýasy aş a uly bolan ýarymgeçiriji bolup, şeýle ýarymgeçirijiniň hususy häsiýeti doly ýüze çykman, garyndynyň häsiýeti ýüze çykýar. Aş a garyndyly ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesi gadagan bolmadyk zonalaryň içinde (geçiş we walent zonalaryň içinde) ýa-da gadagan zonanyň içinde geçiş we walent zonalaryň araçäğinden kT ululykdan uly bolmadyk aralykda ýerleşýär. Aş a garyndyly ýarymgeçirijiler hususy ýarymgeçirijilere örän ýokary derejede garyndy goşmak arkaly alynýar.

4-nji mesele. Otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$) kremniý Si we germaniý Ge ýarymgeçirijileriň erkin zarýad geçirijileriniň aş a garyndyly ýagdaýyna geçýän akseptor garyndysynyň konsentrasiýasyny tapmaly.

Çözülişi

Ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesi F walent zonanyň depesine ýa-da geçiş zonasynyň düýbüne kT -den uly bolmadyk aralyga çenli golaýlan ýagdaýynda aş a garyndyly ýagdaý ýüze çykýar.

$$F - E_v \leq kT.$$

Haçan-da doly ionlaşma ýüze çykanda, deşikleriň konsentrasiýasy p şeýle kesgitlenilýär:

$$p = N_v \exp \left(\frac{E_v - F}{kT} \right)$$

we deşikleriň konsentrasiýasy p ýarymgeçirijidäki garyndynyň derejesine N_A deňdir:

$$N_A = p = \frac{N_v}{q}.$$

Kremniý üçin $p = 3,8 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$, germaniý üçin $p = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$.

5-nji mesele. Otag temperaturasynda kremniý Si, germaniý Ge, arsenid galliý GaAs we antimonid indiy InSb monokristallarynyň hususy udel garşylyklaryny ρ_i hasaplaň.

Çözülişi

Hususy ýarymgeçirijide udel elektrik geçirijiligi:

$$\sigma_i = qn\mu_n + qp\mu_p = qn_i(\mu_n + \mu_p),$$

bu ýerde μ_n we μ_p – deňşililikde elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi.

$$\rho_i = \frac{1}{\sigma_i}.$$

Bu ýerden udel garşylygyň bahasyny alarys:

	Si	Ge	GaAs	InSb
$\rho_i, \text{Om}\cdot\text{sm}$	$1,9 \cdot 10^5$	43	$6,4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-3}$

6-njy mesele. Hususy kremniniň gadagan zonasynyň giňligi $E_g = 1.12 \text{ eV}$. 300 K we 0 K temperaturalarda geçiş zonasynyň düýbüne ýakyn derejäniň elektron bilen doly bolmagynyň ähtimallygyny hasaplamaly. Görkezilen temperaturalarda, haçan-da ýarymgeçirijä tolkun uzynlyklary $\lambda = 0,6$ we $2,0 \text{ mkm}$ bolan elektromagnit şöhlesi täsir etse geçiş zonasynyň düýbüne ýakyn derejäniň elektron bilen doly bolmagynyň ähtimallygy nähili üýtgär? $T = 300 \text{ K}$ temperaturada $(E - E_f)$ tapawudy $E_g/2$ deň diýip hasap etmeli.

Çözülişi

Fermi – Diragyň funksiýasy boýunça mikrobölejikleriň energiýa boýunça paýlanyşy şeýle görnüşde ýazylýar:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)},$$

bu ýerde $f(E)$ – elektronyň energiýasynyň E bolmagynyň ähtimallygy. $T=0\text{K}$ temperaturada:

$$E > E_f, e^{(E - E_f)/kT} \rightarrow \infty, f(E) = 0.$$

$T=300 \text{ K}$ temperaturada elektronyň geçiş zonanyň düýbüne görä E energiýa eýe bolmagynyň ähtimallygyny tapalyň:

$$f(E) = \left[1 + \exp\left(0,56 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)\right)\right]^{-1} = \left[1 + \exp(21,6)\right]^{-1} = 4 \cdot 10^{-10}.$$

Haçan-da ýarymgeçiriji nusgasyna tolkun uzynlygy $\lambda = 0,6 \text{ mkm}$ bolan ýagtylyk şöhlesi täsir etse, bu şöhläniň ýygylgy:

$$\nu = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 / (0,6 \cdot 10^{-6}) = 5 \cdot 10^{14} \text{ Gs}, \text{ deňdir.}$$

Onuň energiýasy:

$$E = h\nu = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 5 \cdot 10^{14} = 3,31 \cdot 10^{-19} \text{ Dj} = 2,1 \text{ eV}.$$

Ýagny $2,1 \text{ eV} > 1,12 \text{ eV}$, onda elektronyň geçiş zonasynda bolmagynyň ähtimallygy 0 K üçin we 300 K üçin hem artýar.

Eger-de kremniý ýarymgeçirijisine tolkun uzynlygy $\lambda=2 \text{ mkm}$ bolan ýagtylyk şöhlesi täsir etse, onda bu şöhläniň ýygylgy:

$$\nu = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 / (2 \cdot 10^{-6}) = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ Gs},$$

$$E = h\nu = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 1,5 \cdot 10^{14} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,62 \text{ eW}.$$

Bu ýagdaýda täsir edýän şohläniň energiýasy $0,62 \text{ eW} < 1,12 \text{ eW}$, şol sebäpli hem $T = 0 \text{ K}$, we $T = 300 \text{ K}$ temperaturalarda geçiş zonasynyň düýbüne ýakyn derejäniň elektron bilen doly bolmagynyň ähtimallygynda hiç hili uly üýtgeşiklik bilmeýar.

7-nji mesele.

Otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$), kremniý ýarymgeçirijisi $8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ myşýak atomyny we $2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bor B atomyny özünde saklaýan bolsa, elektronlaryň we deşikleriň deňagramlykdaky konsentrasiýasyny hem-de Ferminiň derejesini, (Ferminiň hususy derejesi E_i seredende) tapyň.

Çözülişi

Kremniý ýarymgeçirijisinde donor garyndysy bolan myşýagyň konsentrasynyň, akseptor garyndysy boruň konsentrasiýasyndan ýokarydygy sebäpli, kristal n-görnüşli geçirijilige eýedir. Garyndylaryň jemleýji konsentrasiýasy, donor ($8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$) we akseptor ($2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$), garyndylaryň konsentrasiýalarynyň tapawudyna, ýagny $6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ deňdir.

Berlen temperaturada elektronlaryň konsentrsiýasy, garyndylaryň jemleýji konsentrasiýasyna deň diýip alyp bolýar, ýagny $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$. Deşikleriň konsentrasiýasyny özara täsirleşýän massalaryň kanunyndan peýdalanyp hasaplalyň:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{6 \cdot 10^{16}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-3}.$$

Ferminiň derejesiniň ýerleşişini tapalyň:

$$E_{fn} - E_i = kT \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot \ln\left(\frac{3,5 \cdot 10^{16}}{1,5 \cdot 10^{16}}\right) = 0,629 \cdot 10^{-19} \text{ Dj} = 0,393 \text{ eW}$$

2.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇIN MESELELER

1. Hususy germaniýniň geçiş zonasynyň aşaky derejesinde elektronynyň bolmagynyň ähtimallygy nähili, eger nusganyň temperaturasy: a) 30 K ; b) 300 K bolanda?

Jogaby: a) 10^{-60} ; b) 10^{-6} .

2. Otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$) geçiş zonanyň aşaky derejesinde elektronynyň bolmagynyň ähtimallygy nähili bolar a) hususy germaniýde; hususy kremniýde; w) almazda ($E_g = 5,6 \text{ eW}$).

Alnan netijeleriň fiziki manskyny düşündiriň. Gadagan zonanyň giňligi ýarymgeçirijiniň haýsy häsiýetlerine täsir edýär?

Jogaby: a) 10^{-6} ; b) $10^{-9,3}$; w) 10^{-47} .

3. D.I. Mendeleewiň periodik sistemasynyň IV toparyna degişli ýarymgeçirilerde V topar garyndy atomlarynyň daşky orbitasynyň başinji elektronynyň hereketini, takmyndan hususy ýarymgeçirijiniň dielektrik syzyjylygy bolan jisimiň birlik položitel zarýdly $+q$ ýadrosynyň daşynda tegelek orbita boýunça hereket görnüşinde seredip bolar. Otnositel dielektrik syzyjylygy 12-ä deň bolan kristalda, elektronynyň erkin bolup geçiş elektronyna öwürilmegi üçin oňa $0,1 \text{ eW}$ energiýanyň gerekdigini görkezň. Elektronynyň esasy ýagdaýynyň orbitasynyň radiusyny kesgitläň we şeýlelikde, elektronynyň dielektrik syzyjylygy hususy ýarymgeçirijiniňkä deň bolan sredada hereket edýändigini baradaky göz önüne getirmäniň dogrudygyny tassyklaň. Yarymgeçirijiniň gözeneginiň hemişeligi $5,42 \cdot 10^{-4} \text{ MKM}$ deňdir.

Jogaby: $E_n = 6,35 \cdot 10^{-4} \text{ MKM}$; $r_n = 0,094 \text{ eW}$.

4. Hususy ýarymgeçirijide otag temperaturasynda ($T = 300$ K), gadagan zonasynyň ortasyna görä Ferminiň derejesiniň ýerleşişini, haçan-da elektronyň effektiv massasynyň ululygy deşigiň effektiv massasynyň ululygyndan iki esse köp bolan ýagdaýynda, kesgitlemeli.

Jogaby: Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasyndan $\frac{3}{4}kT \cdot \ln\left(\frac{m_n}{m_p}\right) = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ ululyga aşakda ýerleşýär.

5. Kremniý Si we arsenid galliý GaAs ýarymgeçirijilerine donor garyndysy $N_D = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ konsentrasiýa çenli garylan. $T = 300$ K temperaturada, garyndynyň doly ionlaşan ýagdaýynda, esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasyny tapmaly.

Jogaby: Kremniý üçin $p_0 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ sm}^{-3}$, arsenid galliý üçin $p_0 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ sm}^{-3}$.

6. Udel garşylygy $\rho = 1 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bolan elektron görnüşli n-GaAs ýarymgeçirijide temperaturanyň $T = 300$ K-den $T = 77$ K-e çenli üýtgemegi bilen Ferminiň derejesiniň göwrüm ýerleşişiniň üýtgeýişini tapmaly.

Jogaby: $T = 300$ K-de $f_0 = 0,47 \text{ eV}$, $T = 77$ K-de $f_0 = 0,72 \text{ eV}$, onda $\Delta f_0 = 0,25 \text{ eV}$.

7. $T = 300$ K temperaturada hususy ýarymgeçirijide geçiriji erkin elektronlaryň konsentrasiýasy $1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ deň. Bu ýarymgeçiriji üçin gadagan zonanyň giňligini we Ferminiň derejesiniň ýerleşişini tapmaly, haçan-da geçiş zonasyna derejeleriň dykzlygy şu formula bilen aňladylanda:

$$N_C = GT^{\frac{3}{2}},$$

bu ýerde G hemişelik $G = 4,83 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$.

Jogaby: $E_g = 1 \text{ eV}$, Ferminiň derejesi geçiş zonanyň düýbünden $0,5 \text{ eV}$ aşakda ýerleşen.

8. Otag temperaturasynda $T = 300$ K n- görnüşli ýarymgeçirijide Ferminiň derejesiniň ýerleşişini tapmaly, haçan-da germaniýniň $2 \cdot 10^6$ atomyna bir sany garyndy atomy düşýän bolsa. Germaniýde atomlaryň konsentrasiýasy $4,4 \cdot 10^{28} \text{ atom/m}^3$ deňdir. Geçiş zonasynyň düýbi bilen donor derejesiniň aralygy $0,01 \text{ eV}$ deňdir.

Jogaby: Ferminiň derejesi geçiş zonanyň düýbünden $0,18 \text{ eV}$ aşakda ýerleşen.

9. $T = 300$ K temperaturada 1 sm^3 göwrümde $5 \cdot 10^{16}$ myşýak atomyny saklaýan germaniý kristalynda gadagan zonanyň ortasyna görä Ferminiň derejesiniň ýerleşişini tapmaly.

Jogaby: Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasyndan $0,196 \text{ eV}$ ýokarda ýerleşýär.

10. $T = 400$ K temperaturada 1 sm^3 göwrümde $5 \cdot 10^{16}$ surma atomyny saklaýan germaniý kristaly üçin geçiş zonanyň düýbüne görä Ferminiň derejesiniň ýerleşişini hasaplamaly.

Jogaby: Ferminiň derejesi geçiş zonanyň düýbünden $0,229 \text{ eV}$ aşakda ýerleşýär.

11. P-görnüşli kremniý kristalynda kremniniň her bir 10^8 atomyna akseptor garyndysynyň bir atomy düşýär. Otag temperaturasynda ($T = 300$ K) walent zonasyna görä Ferminiň derejesiniň ýerleşişini tapmaly.

Jogaby: Ferminiň derejesi walent zonanyň depesinden $0,279 \text{ eV}$ ýokarda ýerleşýär.

3. DIFFUZIÝA WE DREÝF. GENERASIÝA WE REKOMBINASIÝA.

3.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Ýarymgeçirijide diffuziýa togy.
2. Ýarymgeçirijide dreýf togy.
3. Doly toguň kanuny.
4. Deňagramlylykda bolmadyk zarýad geçirijileri. Zarýad geçirijileriniň generasiýasy we rekombinasiýasy.

3.2. MESELE ÇÖZMEK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

1. Eýnşteýniň gatnaşygy:

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q},$$
$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q},$$

Bu ýerde D_n we D_p – deňşlilikde, elektronlaryň we deşikleriň diffuziýa koeffisiýentleri.

2. Diffuziýa togunyň dykzlygy:

- elektronlar üçin

$$j_{nD} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

- deşikler üçin

$$j_{pD} = qD_p \frac{dp}{dx}$$

3. Dreýf togunyň dykzlygy:

- elektronlar üçin

$$j_{ne} = qn\mu_n E$$

- deşikler üçin

$$j_{pe} = qp\mu_p E,$$

Bu ýerde E – elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň ululygy.

4. Ýarymgeçiriji üçin doly toguň kanuny:

- n –görnüşli

$$j_n = j_{ne} + j_{nD} = q \left(n\mu_n E + D_n \frac{dn}{dx} \right)$$

-p –görnüşli

$$j_p = j_{pe} + j_{pD} = q \left(p\mu_p E - D_p \frac{dp}{dx} \right)$$

5. Zarýad geçirijileriniň rekombinasiýa tizligi:

- elektronlar üçin

$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n},$$

- deşikler üçin

$$R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p},$$

Bu ýerde Δn we Δp – deňagramlykda bolmadyk (artykmaç) elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy, τ_n we τ_p – ýarymgeçirijide deňagramlykda bolmadyk zaryad geçirijileriniň ýaşaýyş wagty.

6. Wagta baglylykda deňagramlykda bolmadyk zaryad geçirijileriniň (elektronlaryň) konsentrasiýasynyň üýtgeýşi:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$$

Bu ýerde Δn_0 – ýarymgeçirijilerde wagtyň başlangyç momentinde deňagramlykda bolmadyk elektronlaryň konsentrasiýasy.

7. Ýarymgeçirijide artykmaç elektronlaryň konsentrasiýasynyň paýlanyşy:

$$\Delta n(x) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right)$$

8. Degişlilikde elektronlaryň we deşikleriň diffuziýa uzynlygy:

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

3.3. MESELE ÇÖZMEĞIŇ MYSALLARY

1-nji mesele. N-görnüşli geçirijilikli uzynlygy 1 sm we kese kesiginiň meýdany 1 mm² bolan germaniý ýarymgeçiriji nusganyň udel garşylygy 0,2 Om·m, esasy bolmadyk zaryad geçirijileriniň ýaşaýyş wagty $\tau = 100$ mks. Nusga tolkun uzynlygy $\lambda = 0,546$ mkm bolan monohromatik şöhle düşär. Nusga gelip düşýän şöhläniň ählisi elektron-deşik jübütlerini generirlemäge harç bolýar diýip hasap etseň, nusganyň garşylygynyň iki esse azalmagy üçin onuň üstüne nähili ýagtylyk akymynyň düşmelidigini kesgitlemeli. Ýagtylygyň kwant çykyşyny bire deň diýip almaly.

Çözülişi

Ýarymgeçiriji nusganyň udel elektrik geçirijiliginiň iki esse artmagy üçin, ýagtylyk generasiýasy bilen näçe mukdarda zaryad geçirijileriniň goşulmalydygyny bilmeklik gerek, şol sebäpli hem, ilki bilen ýagtylyk düşmedik ýagdaýdaky (garaňkyda) zaryad geçirijileriniň konsentrasiýasyny tapmaly. Udel geçirijiligi tapmaklygyň aňlatmasyny we $n_i^2 = n p$ gatnaşykdan peýdalanylýan udel geçirijilik üçin deňlimäni şeýle görnüşde ýazyp bolar:

$$\sigma = \frac{J}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p) = q\left(n\mu_n - \frac{n_i^2}{n\mu_p}\right) \quad (3.1)$$

Germaniý ýarymgeçirijisi üçin otag temperaturasynda $n_i^2 = 6,25 \cdot 10^{38} \text{ m}^{-3}$; $\mu_n = 0,39 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; $\mu_p = 0,19 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

Ululyklaryň billi bahalaryny 3.1 formula goýup alarys:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,2} = 1,6 \cdot 0,39 \cdot 10^{-19} n + \frac{1,6 \cdot 6,25 \cdot 0,19 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{38}}{n},$$

Özgertmeden soň alarys:

$$1,6 \cdot 0,39 \cdot 10^{-19} n^2 - 5n + 6,25 \cdot 1,6 \cdot 0,19 \cdot 10^{38} \cdot 10^{-19} = 0.$$

Bu deňligi n -e görä çözüp, n -görnüşli ýarymgeçiriji nusgada ýagtylyk düşmedik ýagdaýynda elektronlaryň konsentrasiýasyny alýarys:

$$n = 7,6 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}.$$

Deşikleriň konsentrasiýasy:

$$p = n_i^2 / n = 6,25 \cdot 10^{38} / (7,6 \cdot 10^{19}) = 8,2 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}.$$

Ýagtylyk şöhesiniň täsiri bilen nusgada elektronlaryň we deşikleriň deň mukdary generirlenýär, şol sebäpli hem artykmaç dörän elektronlaryň we deşikleriň sany birmeňzeş bolar, ýagny $\Delta n = \Delta p$.

Netijede, ýagtylyk şöhesi täsir edýän nusganyň udel elektrik geçirijiligi:

$$\sigma = q(n + \Delta n)\mu_n + q(p + \Delta p)\mu_p = q(\mu_n \cdot n + \mu_p p) + q(\mu_n + \mu_p)\Delta n,$$

Deňlikden Δn -iň bahasyny tapýarys:

$$\Delta n = 5,4 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}.$$

Bu ýerde Δn –ýagtylyk şöhesiniň üznüksiz täsiriniň esasynda generirlenen elektronlaryň mukdary. Nusganyň $1 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6} = 10^{-8} \text{ m}^{-3}$ göwrüminde, $5,4 \cdot 10^{11}$ deň artykmaç elektronlar döredilmeli we edil şol mukdarda hem deşikler döredilmeli. Meseläniň şertine laýyklykda bu artykmaç zaryad geçirijileri $5,4 \cdot 10^{11} / \tau = 5,4 \cdot 10^{11} \cdot 10^4 = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ tizlik bilen rekombinirlenýärler.

Şeýlelikde, zerur bolan dinamiki deňagramlylygy saklamaklyk üçin, ýarymgeçiriji nusganyň üstüne bir sekuntda $5,4 \cdot 10^{15}$ foton gelip düşmelidir. Meseläniň şertine laýyklykda ýagtylygyň $\lambda = 0,546 \text{ mkm}$ tolkun uzynlygynda, 1 Lm ýagtylyk akymy 0,0016 Wt ekwiwalent, onda ýagtylyk akymyny tapmak mümkin:

$$\Phi = \frac{5,4 \cdot 10^{15} \cdot h\nu}{0,0016} = \frac{5,4 \cdot 10^{15} hc}{0,0016\lambda} = 1,2 \text{ Lm}$$

2-nji mesele. Ýagtylyk şöhesiniň täsiri bilen ýarymgeçiriji kristalda zaryad geçirijileriniň birmeňzeş paýlanan artykmaç konsentrasiýasy Δn emele gelýär. Esasy bolmadyk zaryad geçirijileriniň deňagramlyk ýagdaýyndaky konsentrasiýasy $2,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ bolup, konsentrasiýanyň azalmagynyň başlangyç tizligi $2,8 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1}$ deňdir.

Kesgitlemeli: a) esasy bolmadyk zaryad geçirijileriniň ýaşayş wagty; b) Ýagtylyk çeşmesi öçürilenden 2 ms soň Δn -iň bahasyny.

Çözülişi

a) Artykmaç zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasynyň wagta baglylykda üýtgeýşi aşakdaky aňlatma bilen ýazylýar:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.2)$$

Bu ýerde Δn_0 – ýagtylyk çeşmesi birleşdirilen momentinde artykmaç zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy; τ - zarýad geçirijileriniň ýaşaýuş wagty; Продифференцируем (3.2) deňligi wagt boýunça differensirleýäris :

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = \frac{\Delta n(0)}{\tau_n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (3.3)$$

Bu ýerde τ_n - p-görnüşli ýarymgeçirijide elektronlaryň ýaşaýuş wagty.

$t = 0$ diýip hasap etseň, konsentrasiýanyň azalmagynyň başlangyç tizligi (3.3) deňlikden kesgitlenilýär, ýagny

$$\left. \frac{d\Delta n(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{\Delta n(0)}{\tau_n} = 2,8 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1},$$

Esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň deňagramlykdaky konsentrasiýasy meseläniň şertine görä $\Delta n(0) = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, onda esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň ýaşaýuş wagtny tapýarys:

$$\tau_n = \frac{\Delta n(0)}{d\Delta n / dt} \Big|_{t=0} = 2,5 \cdot 10^{20} / (2,8 \cdot 10^{24}) = 89 \text{ mks}$$

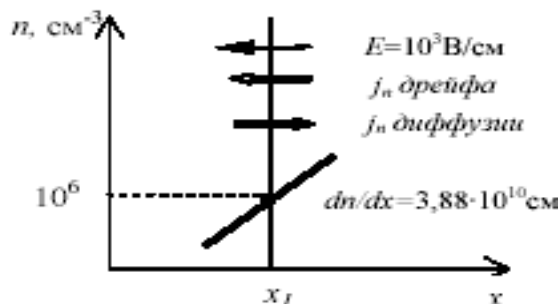
б) Ýagtylyk çeşmesi öçürilenden 2 ms soň zarýd geçirijileriniň artykmaç konsentrasiýasy Δn ($t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$) (3.2) formula bilen hasaplanýär:

$$\Delta n = 4,4 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}.$$

3-nji mesele. Kremniý kristalynda $T = 300 \text{ K}$ temperaturada, x okuna perpendikulýar bolan x_1 tekizlikde elektrik meýdany nola deň däldir. Haçan-da $x = x_1$ bolanda elektronlaryň konsentrasiýasy $6 \cdot 10^6 \text{ sm}^{-3}$ deňdir. Bu tekizlige perpendikulýar ugurda, zarýdlaryň konsentrasiýasynyň paýlanyşy deňölçegli däldir (3.1. surat). Emma x_1 tekizlik boýunça elektrik togy nola deňdir. Düşündiriň:

a) Nämе üçin tok akmaýar;

b) Eger $E = -10^3 \text{ W/sm}$ (10^3 W/sm x okuna görä ters ugura urukdyrylan) bolsa, onda x_1 tekizlige perpendikulýar ugurda elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýenti nämä deň?



3.1. surat ($dn/dx = 3,88 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-4}$)

Çözülüşi

a) Güýjenmesi E bolan elektrik meýdany dreýf toguny ýüze çykarýar. Jemleýji tok nola deň bolandygy sebäpli, dreýf toguna ululygy boýunça deň we emma oňa garşylykly ugura urukdyrylan toguň diffuziýa düzüjisi bolmaly (3.1 surata seret). Toguň bu iki düzüjisiniň deňligi, toguň jeminiň nol ýagdaýyna gabat gelýär.

b) Bu ýagdaýda n-görnüşli ýarymgeçirijide doly tok üçin aňlatma şu görnüşe eýedir:

$$j_n = q \left(n \mu_n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) = 0$$

Eýnşteýniň gatnaşygyny hasaba alyp alarys:

$$\frac{dn}{dx} = - \left(\frac{\mu_n}{D_n} \right) n E = - \frac{q}{kT} n E = \frac{-10^6 \cdot (-10^3)}{0,0258} = 3,88 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-4}.$$

4-nji mesele. T=300 K temperaturada p-Si ýarymgeçiriji nusgada x oky boýunça garyndylaryň

paýlanyşy $N_A(x) = N \cdot e^{\frac{x}{x_0}}$, bu ýerde $x_0=0,5$ mkm. $P(x)=N_A(x)$ diýip kabul edip, N-e baglylykda içki elektrik meýdanynyň güýjenmesini E_i , deşikleriň diffuziýa we dreýf toklarynyň dykzlygyny hasaplamaly. $D_p=10 \text{ sm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ we $\mu_p=400 \text{ sm}^2/\text{W} \cdot \text{s}$ diýip hasap etmeli.

Çözülüşi

Termodinamiki deňagramlyk şertlerinde deşikleriň doly togunyň dykzlygy j_p nola deň, ýagny:

$$j_p = j_{pe} + j_{pD} = q \left(n \mu_p E - D_p \frac{dp}{dx} \right) = 0$$

Bu ýerden içki meýdan
$$E_i = \frac{D_p}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{1}{p}.$$

Differensirläp alýarys:
$$\frac{dp}{dx} = \frac{dN_A(x)}{dx} = - \frac{p}{x_0},$$

E_i - niň bahasyny tapýarys
$$E_i = \frac{D_p}{\mu} \frac{1}{x} = 500 \text{ W/sm},$$

we
$$j_{pe} = j_{pD} = 3,2 \cdot 10^{-14} \cdot N_A.$$

5-nji mesele. Udel garşylygy $0,6 \text{ Om} \cdot \text{Sm}$ bolan n-Si ýarymgeçiriji nusgasy, hususy geçirijilikli ýarymgeçiriji üçin Ferminiň derejsiniň derejesinde ýerleşen $N_i=10^{15} \text{ sm}^{-3}$ generasiýa rekombinasiýa merkezlerini saklaýar. Zaryad geçirijilerini saklamagyň kesigi (seçeniýe zahwata nositeleý) $\sigma_t = 10^{-15} \text{ sm}^{-2}$, ýylylyk tizligi $v_t=10^7 \text{ sm} \cdot \text{s}^{-1}$.

1) Eger ýarymgeçirijiniň seredilýän bölegi hereket ediji zaryad geçirijilerine garyplaşan bolsa, generirleme tizligini hasaplamaly.

2) Ýarymgeçirijide deňagramlykdaky ýagdaýyna seredeniňde esasy bolmadyk zaryad geçirijileriň konsentrasiýasynyň azalan ýerinde generasiýa tizligini hasaplamaly.

Çözülüşi

Haçan-da $E_i=E_t$ şerti göz önünde tutsaň generirlenmäniň derejesi formula bilen berilýär:

$$G = \frac{pn - n_i^2}{(p + n + 2n_i)\tau_0}.$$

Garyndynyň derejesine laýyklykda, $N_D=n_0=7\cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň deňagramlykdaky konsentrasiýasyny hasaplamak bolýar $p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 2,1\cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Ýaşayyş wagtyny τ_0 şeýle hasaplaýarys:

$$\tau_0 = \frac{1}{N_t O_t v_t},$$

$\tau_0 = 1\cdot 10^{-7} \text{ s}$. Zarýad geçirijileriniň deňagramlykda bolmadyk konsentrasiýasy: esasy zarýadlar üçin $n = n_0 + \Delta n \approx n_0$ we esasy bolmadyk zarýadlar üçin $p = p_0 + \Delta p \approx \Delta p$ deňdir. Birinji ýagdaýda, haçan-da $n, p \ll n_i$ alarys:

$$G = \frac{-n_i^2}{n_i 2 \cdot \tau_0} = -\frac{n_i}{2 \cdot \tau_0},$$

$G=7,25\cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$, ikinji ýagdaý üçin $n \gg n_i$ we $p_0 \gg p$

$$G = \frac{n_0 \Delta p}{n_0 \tau_0} = \frac{p - p_0}{\tau_0} = -\frac{p_0}{\tau_0}$$

$G=2,6\cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$.

6-njy mesele. Daşky täsiriň netijesinde GaAs ýarymgeçiriji nusgasynda $10^{20} \text{ sm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ elektron-deşik jübüdi emele gelýär. $T=300 \text{ K}$ temperaturada garyndynyň derejesi $N_D=2\cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, zaýadlaryň ýaşayyş wagty $\tau_0=5\cdot 10^{-8} \text{ s}$.

Hasaplamaly: 1) rekombinasiýa koeffisiýentini; 2) esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň artykmaç konsentrasiýasyny.

Çözülüşi

Rekombinasiýa koeffisiýenti r gatnaşykdan $G=R=rnp$ alýarys:

$$G = r(n + p) = r(n_0 + \Delta n + p_0 + \Delta p) = r\Delta n(n_0 + p_0) = r\Delta n \cdot n_0.$$

Bu ýerden:

$$r = \frac{G}{\Delta n} \cdot \frac{1}{n_0} = \frac{1}{\tau_0 n_0}.$$

$R=1\cdot 10^{-8} \text{ sm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, elektronlaryň artykmaç konsentrasiýasy $\Delta n=G\tau_0=5\cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$.

3.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇİN MESELELER

1. Otag temperaturasynda $T=300$ K, ýarymgeçiriji nusga güýjenmesi $E = 10, 100$ we 1000 W/sm bolan daşky elektrik meýdany täsir edýän bolsa, germanide elektronlaryň we deşikleriň orta dreýf tizligini kesgitlemeli.

Jogaby: elektronlaryň orta dreýf tizligi: $390, 39 \cdot 10^2$ we $39 \cdot 10^3$ m/s;

deşikleriň orta dreýf tizligi: $190, 19 \cdot 10^2$ we $19 \cdot 10^3$ m/s deňdir.

2. 1-nji meseläni kremniý ýarymgeçirijisi üçin çözüň.

Jogaby: elektronlaryň orta dreýf tizligi: $140, 14 \cdot 10^2$ we $14 \cdot 10^3$ m/s;

deşikleriň orta dreýf tizligi: $50, 500$ we 5000 m/s deňdir.

3. Germaniý ýarymgeçiriji nusgasy garyndy görnüşinde 1 m^3 göwrümde 10^{20} donor atomyny we 1 m^3 göwrümde $7 \cdot 10^{19}$ akseptor atomyny saklaýar. Otag temperaturasynda ($T=300$ K) hususy germaniý ýarymgeçiriji nusgasynyň udel garşylygy $0,6 \text{ Om} \cdot \text{m}$. Eger nusga güýjenmesi 200 W/m bolan täsir etse, doly dreýf togunyň dykzlygyny tapmaly. Elektronlaryň hereket edijiligi $\mu_n = 0,38 \text{ m}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$, deşikleriň hereket edijiligi $\mu_p = 0,18 \text{ m}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$.

Jogaby: 524 A/m^2 .

4. Uçlaryna 6 W potensiallaryň tapawudy birleşdirilen, uzynlygy 5 sm we kese kesigi $0,5 \times 0,5 \text{ sm}^2$ bolan n görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji steržniň üstünden akýan dreýf togunyň ululygyny kesgitlemeli. Otag temperaturasynda ($T=300$ K) kremniý ýarymgeçiriji nusgada geçiriji elektronlaryň konsentrasiýasy 10^{22} m^{-3} we hususy zaryad geçirijileriniň konsentrasiýasy $2,05 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ deň. Bu temperaturada elektronlaryň we deşikleriň diffuziýa koeffisiýenti degişlilikde $0,31 \cdot 10^{-2}$ we $0,065 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Jogaby: $0,576 \text{ A}$.

5. Udel garşylygy $5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý kristalynyň üstünden dykzlygy 10 mA/sm^2 dreýf togy akýar. Deşikleriň we elektronlaryň orta dreýf tizligini tapmaly.

Jogaby: 25 we 70 sm/s .

6. Otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$) elektron dreýf togunyň deşikleriň dreýf toguna bolam garnaşygyny kesgitlemeli: a) hususy germaniý; b) hususy kremniý; w) udel garşylygy $\rho = 5 \text{ Om} \cdot \text{Sm}$ bolan n- görnüşli germaniý; g) udel garşylygy $\rho = 5 \text{ Om} \cdot \text{Sm}$ bolan n- görnüşli kremniý; d) udel garşylygy $\rho = 5 \text{ Om} \cdot \text{Sm}$ bolan p- görnüşli germaniý;

Jogaby: a) $2,05$; b) $2,8$; w) 337 ; g) $2,23 \cdot 10^9$; d) $2,96 \cdot 10^{-3}$.

7. Kremniý monokristalynda otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$) elektronlaryň μ_n we deşikleriň μ_p hereket edijiligi degişlilikde 1400 we $500 \text{ sm}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$. Bu temperaturada elektronlaryň we deşikleriň diffuziýa koeffisiýentini kesgitlemeli.

Jogaby: $36,1$ we $12,9 \text{ sm}^2/\text{s}$.

8. Otag temperaturasynda ($T = 300 \text{ K}$) n-görnüşli germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda donor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ deňdir. Eger elektronlaryň ýaşayyş wagty $\tau_n = 50 \text{ mks}$ bolsa, olaryň konsentrasiýasyny n_n we diffuziýa uzynlygyny L_n kesgitlemeli.

Jogaby: $p_n = 6,25 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$; $L_n = 7,1 \cdot 10^{-2} \text{ sm}$.

9. Otag temperaturasynda $T = 300\text{ K}$ n-görnüşli germaniý ýarymgeçirijisinde elektronlaryň diffuziýa uzynlygy $L_n = 0,15\text{ sm}$, diffuziýa koeffisiýenti $D_n = 93\text{ sm}^2/\text{s}$ bolsa, elektronlaryň ýaşayş wagty τ_n we hereket edijiligini μ_n kesgitleň.

Jogaby: $\tau_n = 242\text{ mks}$; $\mu_n = 3600\text{ sm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$.

10. Otag temperaturasynda $T = 300\text{ K}$, p-görnüşli kremniý ýarymgeçirijisinde deşikleriň diffuziýa uzynlygy $L_p = 0,07\text{ sm}$ we akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 1\cdot 10^{16}\text{ sm}^{-3}$ bolsa, olaryň ýaşayş wagty τ_p we hereket edijiligini kesgitleň.

Jogaby: 400 mks ; $462\text{ sm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$

11. Otag temperaturasynda ($T = 300\text{ K}$) n-görnüşli germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda, elektronlaryň ýaşayş wagty $\tau_n = 500\text{ mks}$, hereket edijiligi $\mu_n = 3600\text{ sm}^2/(\text{W}\cdot\text{s})$ bolsa, elektronlaryň diffuziýa uzynlygyny L_n we diffuziýa koeffisiýentini D_n kesgitleň.

Jogaby: $L_n = 21\cdot 10^{-2}\text{ sm}$; $D_n = 93\text{ sm}^2/\text{s}$.

12. Otag temperaturasynda $T = 300\text{ K}$, n-görnüşli kremniý ýarymgeçirijisinde elektronlaryň diffuziýa koeffisiýenti $D_n = 31\text{ sm}^2/\text{s}$ bolsa, elektronlaryň hereket edijiligini kesgitlemeli.

Jogaby: $\mu_n = 1200\text{ sm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$.

13. Otag temperaturasynda $T = 300\text{ K}$, udel garşylygy $\rho = 3\text{ Om}\cdot\text{sm}$ bolan n-görnüşli kremniý ýarymgeçirijisi nusgasynda esasy bolmadyk zaryad geçirijileriniň ýaşayş wagty $\tau_p = 5\text{ mks}$. Yarymgeçiriji nusganyň haýsy hem bolsa bir tekizliginde artykmaç deşikleriň konsentrasiýasy $p = 10^{13}\text{ sm}^{-3}$ girizilýär we wagt bilen hemişelik saklanylýar. Yarymgeçiriji nusganyň bu tekizliginiň örän ýakynynda diffuziýa togunyň dykzlygyny tapmaly. Bu tekizlikden nähili aralykda deşikleriň konsentrasiýasy 10^{12} sm^{-3} deň bolar? Yarymgeçiriji nusganyň uzynlygyny zaryad geçirijileriniň diffuziýa uzynlygyndan has uly diýip hasaplamaly.

Jogaby: $2,6\cdot 10^{-3}\text{ A/sm}^2$; $1,7\cdot 10^{-2}\text{ sm}$.

14. Hususy kremniý ýarymgeçiriji kristalynda elektrik meýdanynyň güýjenmesi $E = 500\text{ W/m}$, elektronlaryň μ_n we deşikleriň μ_p hereket edijiligi degişlilikde $0,14$ we $0,05\text{ m}^2/(\text{W}\cdot\text{s})$ deň. Hususy zaryad geçirijileriniň konsentrasiýasy $n_i = 1,5\cdot 10^{16}\text{ m}^{-3}$.

Kesgitlemeli: a) elektronlaryň v_{dn} we deşikleriň v_{dp} dreýf tizliklerini; b) kremniniň udel garşylygyny ρ_i ; w) doly dreýf toguny I_{dr} haçan-da kese kesiginiň meýdany $S = 3\cdot 10^{-6}\text{ m}^2$ bolanda.

Jogaby: a) $v_{dn} = 70\text{ m/s}$; $v_{dp} = 25\text{ m/s}$; b) $\rho_i = 2,2\cdot 10^3\text{ Om}\cdot\text{m}$; w) $I = 0,684\text{ mKA}$.

15. Eger p-görnüşli germaniý üçin diffuziýa koeffisiýenti $D_n = 99\cdot 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ we n- görnüşli germaniý üçin $D_p = 47\cdot 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, esasy bolmadyk zaryad geçirijileriniň ýaşayş wagty $\tau_n = \tau_p = 10^{-4}\text{ s}$ bolsa, onda p-görnüşli germaniýde elektronlaryň diffuziýa uzynlygyny we n-görnüşli germaniýde deşikleriň diffuziýa uzynlygyny hasaplamaly.

Jogaby: $0,99$ we $0,69\text{ mm}$.

4. ÝARYMGEÇIRIJILERDE KINETIKI HADYSALAR

4.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi. Hususy we garyndyly ýarymgeçirijileriň hereket edijiligi.
2. Ýarymgeçirijilerde galwanomagnit effektləri.

4.2. MESELE ÇÖZMEKLIK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

1. Zarýad geçirijileriniň hereket edijiligi:

- elektronlar üçin:

$$\mu_n = \frac{v_d}{E} = \frac{q\tau_{cn}}{m_n}$$

- deşikler üçin:

$$\mu_p = \frac{v_d}{E} = \frac{q\tau_{cp}}{m_p}$$

bu ýerde q - elektronyň zarýady; v_d – güýjenmesi E bolan elektrik meýdanynyň zarýad geçirijileriniň dreýf tizligi; τ_{cn} we τ_{cp} – deşiklilikde elektronlaryň we deşikleriň ýaýramagynyň orta wagty; m_n we m_p – deşiklilikde elektronlaryň we deşikleriň effektiw massasy.

2. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p),$$

bu ýerde, ρ – ýarymgeçirijiniň udel garşylygy.

3. Holluň effekti

Göniburçly koordinatalar sistemasynyň elektrik we magnit meýdanlary x we y oklary boýunça urukdyrylan bolsun. Güýjenmesi E_x bolan elektrik meýdanynyň täsiri bilen galyňlygy w bolan göniburçly ýarymgeçiriji nusgadan dykzylygy j_x deň bolan elektrik togy akýar.

Induksiýasy B_z bolan magnit meýdany tarapyndan, x oky boýunça $\mu_n E_x$ tizlik bilen hereket edýän zarýad geçirijisine täsir edýän güýç:

$$F_y = e\mu_n E_x B_z$$

Nusgada ýüze çykýan elektrik meýdanynyň güýjenmesi:

$$E_y = R_x j_x B_z$$

Holluň elektrigi hereketlendiriji güýji U_x :

$$U_x = R_x \frac{I_x B_z}{w},$$

bu ýerde, $R_x = \frac{1}{en}$ – koeffisiýent - Holluň hemişeligi; n – zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy;

I_x – ýarymgeçiriji nusganyň üstünden akýan toguň ululygy.

Ýeterlik uly magnit meýdanynda zarýad geçirijileriniň hereket edijiligi:

$$\mu_n = -\frac{R_x}{\rho},$$

Bu ýerde ρ – udel garşylyk.

4. Magnitrezistiw effekti

Görälikde (otnositel) magnit meýdanynda garşylygyň üýtgeýşi:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{j_x(B)}{j_x(0)} - 1$$

4.3. MESELE ÇÖZMEĞIŇ MYSALLARY

1-nji mesele. N- görnüşli kremniý ýarymgeçiriji nusgasynyň ölçegi: uzynlygy 10 mm, ini 2mm we galyňlygy 1 mm. Degişlilikde elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi 0,12 we 0,05 m²/(W·s), ýarymgeçirijiniň hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Tapmaly: a) haçan-da nusganyň garşylygy $R = 150 \text{ Om}$ bolsa, nusgada donor garyndysynyň konsentrasiýasyny; b) nusganyň geçirijiliginiň elektron düzüjisiniň deşik düzüjisine bilan gatnaşygyny. σ

Çözülüşi

a) Kremniý ýarymgeçiriji nusgasynyň udel garşylygyny kesgitleliň:

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{150 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,03 \text{ Om} \cdot \text{m}$$

Garyndyly n-görnüşli kremniý nusgasynyň udel garşylygy aşakdaky aňlatma bilen kesgitlenilýär:

$$\rho = \left[q(n\mu_n + p\mu_p) \right]^{-1}$$

Meseläniň şertinden san bahalaryny goýup alýarys:

$$0,12n + 0,05p = 2,08 \cdot 10^{20}$$

$np = n_i^2$, bolýandygyny göz önünde tutup:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1,5 \cdot 10^{16})^2}{n}$$

p-niň bahasyny ýerine goýup alýarys:

$$0,12n^2 + 0,05(1,5 \cdot 10^{16})^2 - 2,08 \cdot 10^{20} n = 0.$$

Bu ýerden elektron geçirijilikli ýarymgeçiriji üçin alýarys: $n = 1,73 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Haçan-da ähli garyndy atomlary ionlaşan ýagdaýynda, $N_d = n = 1,73 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Б) Ýarymgeçiriji nusgalarynda udel geçirijiligiň deşik we elektron düzüjileri şu formulalar bilen kesgitlenilýär:

$$\sigma_p = qp\mu_p; \sigma_n = qn\mu_n.$$

Onda

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{p\mu_p}{n\mu_n} = \frac{(1,5 \cdot 10^{16})^2 \mu_p}{n^2 \mu_n}$$

Bahlaryny ýerine goýup, nusganyň geçirijiligiň elektron düzüjisiň deşik düzüjisine bilan gatnaşygyny taparys:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{2,25 \cdot 10^{32} \cdot 0,05}{(1,73 \cdot 10^{21}) 0,12} = 3,1 \cdot 10^{-11}$$

2-nji mesele. Berlen temperaturada ýarymgeçirijiniň minimal udel elektrik geçirijilige eýedigini görkeziň, haçan-da elektronlaryň konsentrasiýasy $n = n_i$ bolanda, bu ýerde n_i - hususy konsentrasiýa; μ_p u μ_n – deňşililikde deşikleriň we elektronlaryň hereket edijiligi. Bu şertlerde deşikleriň konsentrasiýasy p näçä deň?

Germaniý ýarymgeçirijisiniň hususy we minimal udel elektrik geçirijiligi tapyň, haçan-da $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ($\mu_p = 0,19 \text{ m}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$ u $\mu_n = 0,39 \text{ m}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$) bolanda. Elektronlaryň n we deşikleriň p konsentrasiýasynyň haýsy ululygynda ($n = p = n_i$ bahasyndan başga) bu ýarymgeçiriji hususy geçirijilige deň udel elektrik geçirijilige eýedir?

Çözülişi

Ýarymgeçirijiniň udel elektrik geçirijiligi:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p), np = n_i^2$$

Bu ýerden,

$$\frac{\sigma}{q} = n\mu_n + \frac{n_i^2 \mu_p}{n}$$

Bu aňlatma minimum baha eýe bolýar haçan:

$$\frac{d(\sigma/q)}{dn} = 0,$$

$$\text{Bu ýerden, } \mu_n - \frac{n_i^2 \mu_p}{n^2} = 0 \quad \text{ýa-da} \quad n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}.$$

$$\text{Aňlatmanyň bahasy } \frac{d^2(\sigma/q)}{dn^2} = 0 \quad \text{položitel, ýagny minimumda egreýme nokady}$$

$$p = n_i^2 / n = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}.$$

Hususy ýarymgeçirijide: $\sigma = qn_i (\mu_n + \mu_p) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^{19} \cdot 0,58 = 2,32 \text{ Om/m}$. Minimal udel geçirijiligi:

$$\sigma = n_i q \sqrt{\mu_n \mu_p} + n_i q \sqrt{\mu_p \mu_n} = 2n_i q \sqrt{\mu_n \mu_p} = 2,18 \text{ Cm/m (Om/m)}$$

Udel geçirijilik hususy geçirijilige deňdir, haçan-da:

$$qn\mu_n + qn_i^2\mu_p / n = qn_i(\mu_n + \mu_p).$$

$$\text{Ýa-da } n^2\mu_n - nn_i(\mu_n + \mu_p) + n_i^2\mu_p = 0$$

Bu kwadrat deňligi n -e görälikde çözüp, alarys:

$$n = \frac{n_i}{0,78}(0,58 \pm 0,2),$$

Emma $n \neq n_i$, şerte laýyklykda:

$$n \approx n_i/2 = 1,25 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3};$$

$$p = n_i^2/n = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}.$$

3-nji mesele. Garyndysyz germaniý we kremniý ýarymgeçiriji nusgalarda, 40 we 80°S temperaturalarda erkin elektronlaryň konsentrasiýasyny kesgitlemeli hem-de olaryň 300 K temperaturadaky konsentrasiýalary bilen deňeşdirmeli. Temperaturanyň üýtgemegi bilen geçiş zonada N_c we walent zonada N_v derejeleriň effektiv dykzylygynyň üýtgemegini hasaba almaly däl. Germaniýniň gadagan zonasynyň giňligi $E_g = 0,72$ eW we kremniýniň gadagan zonasynyň giňligi $E_g = 1,12$ eW. Görkezilen temperaturalarda udel garşylygyň ululygyny kesgitlemeli (hereket edijiligiň temperatura bilen üýtgemegini hasaba almaly däl). Germaniý we kremniý ýarymgeçirijileriniň otag temperaturasyndaky udel garşylygyny deňşilikde $0,45$ we $2 \cdot 10^3 \text{ Om} \cdot \text{m}$ diýip almaly.

Çözülişi

Hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy n_i formuladan kesgitlenilýär

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Derejeleriň effektiv dykzylygynyň N_c we N_v temperatura baglylykda az üýtgeýänligi sebäpli, $N_c N_v = \text{const}$. Germaniý ýarymgeçirijisi üçin dürli temperaturalarda hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýalarynyň gatnaşygyny tapalyň.

$T = 300 \text{ K}$ temperaturada:

$$kT = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,0258 \text{ eW}.$$

$T_1 = 40^\circ\text{S} = 313 \text{ K}$ temperaturada:

$$kT_1 = 0,0269 \text{ eB}.$$

Bu temperaturalarda konsentrasiýalaryň gatnaşygy,

$$\frac{n_i(313\text{K})}{n_i(300\text{K})} = \left[\frac{\exp(-0,72/0,0269)}{\exp(-0,72/0,0258)} \right]^{1/2} = 1,77$$

$T_2 = 80^\circ\text{C} = 353 \text{ K}$, temperaturada,

$$kT_2 = 0,0304 \text{ eW}.$$

Onda

$$\frac{n_i(353K)}{n_i(300K)} = \left[\frac{\exp(-0,72/0,0304)}{\exp(-0,72/0,0258)} \right]^{1/2} = 8,3$$

Şeýle görnüşde kremniý ýarymgeçirijisi üçin hem hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýalarynyň gatnaşyklaryny hasaplalyň ($E_g = 1,12$ eV):

$$\frac{n_i(313K)}{n_i(300K)} = \left[\frac{\exp(-1,12/0,0269)}{\exp(-1,12/0,0258)} \right]^{1/2} = 2,43$$

$$\frac{n_i(353K)}{n_i(300K)} = \left[\frac{\exp(-1,12/0,0304)}{\exp(-1,12/0,0258)} \right]^{1/2} = 26,7$$

Hususy germaniýniň udel garşylygy aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$\rho = \frac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)}$$

Zarýad geçirijileriniň hereket edijiligi μ_n we μ_p temperatura bagly däl diýip alarys:

$$\rho(313\text{ K})/\rho(300\text{ K}) = n_i(300\text{ K})/n_i(313\text{ K}).$$

T=40°C (313 K) temperaturada,

$$\rho(313\text{ K}) = n_i(300\text{ K})\rho(300\text{ K})/n_i(313\text{ K}) = 0,45/1,77 = 0,254\text{ Om}\cdot\text{m}.$$

T=80°C (353 K) temperatura üçin hem udel garşylygy ρ tapýarys:

$$\rho(353\text{ K}) = 0,45/8,3 = 0,054\text{ Om}\cdot\text{m}.$$

Kremniý ýarymgeçirijisi üçin berlen temperaturalarda udel garşylygyň bahalaryny tapýarys:

$$\rho(313\text{ K}) = 823\text{ Om}\cdot\text{m}; \text{ we } \rho(353\text{ K}) = 74,9\text{ Om}\cdot\text{m}.$$

4-nji mesele. Germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda donorlaryň konsentrasiýasy $N_d = 2 \cdot 10^{20}\text{ m}^{-3}$.

Elektronlaryň effektiv massasy $m_n = 1,57m_0$ deň we donory $r = 5 \cdot 10^{-2}$ mkm bolan ýaýradygy merkez diýip almaly. 300 K temperaturada erkin hereket aralygynyň orta uzynlygyny we çaknyşmalaryň arasyndaky orta wagty kesgitlemeli. Elektronlaryň hereket edijiligini tapmaly.

Çözülişi

Germaniý ýarymgeçirijisinde zarýad geçirijisiniň erkin hereketiniň orta aralygy $\lambda = 1/(N\pi r^2)$, bu ýerde r –sferiki ýaýradygy merkeziň radiusy, N – zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy. Seredilýän ýagdaý üçin:

$$\lambda = 1/(2 \cdot 10^{20} \pi \cdot 25 \cdot 10^{-16}) = 0,64 \cdot 10^{-6}\text{ m}.$$

Çaknyşmalaryň arasyndaky orta wagty $\tau = \lambda/\langle v \rangle$, bu ýerde $\langle v \rangle$ - elektronyň orta tizligi. Öňden belli boluşy ýaly,

$$(1/2) m_n \langle v \rangle^2 = (3/2) kT;$$

$$\tau = \lambda(m_n/3kT)^{1/2} = 0,69 \cdot 10^{-11}\text{ s}.$$

Hereket edijilik:

$$\mu = \frac{q\tau}{m_n} = 0,77 \frac{m^2}{W \cdot s}.$$

4.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇİN MESELELER

1. Otag temperaturasynda $T = 300$ K hususy germaniý ýarymgeçirijisiniň udel garşylygy $\rho = 0,43$ Om·m. Germaniýde elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi deňşilikde $0,39$ u $0,19$ m²/(W·s). Elektronlaryň we deşikleriň hususy konsentrasiýasyny kesgitläň.
Jogaby: $n_i = 2,5 \cdot 10^{19}$ m⁻³.

2. 1-nji meselede seredilen germaniý ýarymgeçiriji nusgasna surma garyndy atomlary şeýle derejede goşulan, ýagny $2 \cdot 10^6$ germaniý atomyna bir garyndy atomy düşýär.

Tapmaly: a) $T = 300$ K temperaturada elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasyny (otag temperaturada surma atomlarynyň ählisi ionlaşan we germaniý atomlarynyň konsentrasiýasy $N = 4,4 \cdot 10^{28}$ m⁻³); b) bu germaniý nusgasynyň udel garşylygyny, berlen temperaturada germaniý nusgasynda elektronlaryň we deşikleriň diffuziýa koeffisiýentini.

Jogaby: a) $n = N_d = 2,2 \cdot 10^{22}$ m⁻³, $p = 2,84 \cdot 10^{16}$ m⁻³;

b) $\rho_n = 7,3 \cdot 10^{-4}$ Om·m; w) $D_n = 10 \cdot 10^{-3}$ m²/s, $D_p = 4,9 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

3. Otag temperaturasynda $T = 300$ K elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasyny kesgitlemeli: a) hususy kremniý kristalynda; b) 1 sm³ göwrümde $5 \cdot 10^{17}$ surma atomy garyndysy bolan kremniý kristalynda.

Jogaby: a) $n_i = p_i = \frac{2(2\pi kT)^{3/2}}{h^3} (m_n m_p)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \approx 10^{10}$ cm⁻³

б) $n_n = 5 \cdot 10^{17}$ sm⁻³, $p_n = 2 \cdot 10^2$ sm⁻³.

4. Otag temperaturasynda $T = 300$ K germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasyny kesgitläň, haçan-da nusgada donor atomlarynyň konsentrasiýasy $N_d = 2 \cdot 10^{14}$ sm⁻³ we akseptor atomlarynyň konsentrasiýasy $N_a = 3 \cdot 10^{14}$ sm⁻³ bolanda.

Jogaby: $n_p = 6,25 \cdot 10^{12}$ sm⁻³, $p_p = 10^{14}$ sm⁻³.

5. Otag temperaturasynda $T = 300$ K a) hususy germaniýniň udel garşylygyny kesgitläň; b) donor garyndyly germaniýniň udel garşylygyny kesgitläň haçan-da germaniýniň 10^8 atomyna bir sany donor garyndysynyň atomy düşýän bolsa kesgitläň?

Jogaby: a) $43,2$ Om·sm; b) $3,64$ Om·sm.

6. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ a) hususy kremniýniň udel garşylygyny kegitläň; b) donor garyndyly kremniýniň udel garşylygyny kesgitläň, haçan-da kremniýniň 10^8 atomyna bir sany donor garyndysynyň atomy düşýän bolsa.

Jogaby: a) $3,29 \cdot 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$; b) $8,93 \text{ Om} \cdot \text{sm}$

7. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$, n-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji nusganyň udel garşylygyny tapmaly, haçan-da donorlaryň konsentrasiýasy $N_d = 10^{14}$ we 10^{18} sm^{-3} bolan ýagdaýynda.

Jogaby : $44,7 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ и $44,7 \cdot 10^{-4} \text{ Om} \cdot \text{sm}$.

8. Germaniý ýarymgeçiriji nusgasyna konsentrasiýasy $N_a = 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolan alýuminiý garyndysy goşulan. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ nusganyň udel geçirijiligini tapmaly.

Jogaby: $\sigma = 0,608 \text{ Om/sm}$.

9. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ hususy kremniý nusgasynyň udel garşylygy $2000 \text{ Om} \cdot \text{m}$ we geçiş zonasyna elektronlaryň konsentrasiýasy $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ we 10^{21} m^{-3} konsentrasiýa çenli akseptor garyndysy garylan kremniýniň nusgasynyň udel garşylygyny kesgitlemeli. Hususy we garyndyly kremniý ýarymgeçirijisi üçin deşikleriň konsentrasiýasy birmeňzeş bolup, $\mu_p = 0,25\mu_n$ deňdir.

Jogaby: $0,14$ и $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Om} \cdot \text{m}$.

10. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$, hususy germaniýniň bir metr kub göwrümünde $4,4 \cdot 10^{28}$ atom bolup, elektronlaryň konsentrasiýasy $2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ deňdir. Garyndyly germaniýde geçiriji elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy näçä deň, haçan-da 10^9 esasy atoma bir sany donor garyndysy ýa-da bir sany akseptor garyndysy düşýän bolsa.

Jogaby: $5,39 \cdot 10^{19} \text{ elektron /m}^3$; $0,99 \cdot 10^{19} \text{ deşik /m}^3$.

11. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ hususy kremniý nusgasynyň udel geçirijiligi $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ Om/m}$. Hususy zaryad geçirijileriniň konsentrasiýasy näçe? Nusgadan tok geçýän bolsa, onda bu toguň näçe bölegi elektron düzüjisidir.

Jogaby: $1,47 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$; $0,74$.

12. Hususy germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda atomlaryň konsentrasiýasy $4,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ deň. $T = 300 \text{ K}$ temperaturasynda $2 \cdot 10^9$ atomdan bir atom ionlaşan. Bu temperaturada elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi degişlilikde $0,39$ и $0,19 \text{ m}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$ deň.

Kesgitlemeli: a) hususy germaniýniň udel geçirijiligini; b) germaniý ýarymgeçirijisine Mendeleewiň tablisasynyň V topar elementi, germaniýniň 10^8 atomyna bir garyndy atomy düşer ýaly garylan ýagdaýynda nusganyň udel geçirijiligini tapyň.

Jogaby: a) $\sigma_i = 2,09 \text{ Om /m}$; b) $\sigma_n = 28 \text{ Om /m}$.

13. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ hususy kremniý nusgasynyň udel garşylygy $2 \cdot 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, geçiş elektronlarynyň konsentrasiýasy $1,5 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$ deň. Şol bir temperaturada donorlaryň konsentrasiýasy $10^{16} \text{ atom/sm}^3$ bolan n-görnüşli geçirijilikli kremniýniň udel garşylygy näçä deň? Elektronlaryň hereket edijiuligi deşikleriň hereket edijiliginden üç esse uly diýip hasap edeliň we bu

gatnaşyk hususy hem-de garyndyly ýarymgeçirijiler üçin saklansyn. Ululyklaryň esasy hasaba alynmadyk özgermelerini hil taýdan esaslandyryň we olar nähili tassyklanylyp bilner.
Jogaby: 0,4 Om·sm.

14. Otag temperaturasynda $T = 300$ K, p - görnüşli geçirijilikli germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasyny we hereket edijiligini tapyň, haçan-da akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, we elektronlaryň diffuziýa koeffisiýenti $D_n = 93 \text{ sm}^2/\text{s}$ bolanda.

Jogaby: $6,25 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$.

15. Otag temperaturasynda $T = 300$ K, kremniý ýarymgeçiriji nusgasyň udel geçirijiligini kesgitläň, haçan-da ýarymgeçirijide akseptorlaryň konsentrasiýasy $N_a = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ we donorlaryň konsentrasiýasy $N_d = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ bolanda.

Jogaby: $8 \cdot 10^{-5} \text{ Om/sm}$.

16. Otag temperaturasynda $T = 300$ K, hususy germaniý ýarymgeçiriji nusgasynda elektronlaryň hereket edijiligi $\mu_n = 3900 \text{ sm}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$ we deşikleriň hereket edijiligi $\mu_p = 1900 \text{ sm}^2/(\text{W} \cdot \text{s})$. Ýarymgeçiriji nusganyň ölçenen udel geçirijiligi 0,01 Om/sm bolanda elektron-deşik jübütleriniň konsentrasiýasyny tapyň.

Jogaby: $1,08 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$.

17. Otag temperaturasynda $T = 300$ K, p-görnüşli geçirijilikli germaniý nusgasynda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasyny kesgitläň, haçan-da ýarymgeçiriji nusganyň udel elektrik geçirijiligi $\sigma_p = 100 \text{ Om/sm}$.

Jogaby: $p_p = 3,29 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$; $n_p = 1,9 \cdot 10^9 \text{ sm}^{-3}$.

5. ÝARYMGEÇIRIJILERDE ÜST HADYSALARY. MDÝ-STRUKTURALARY.

5.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Puassonyň Deňlemesi. Üst potensialy. Üstüň geçirijiligi.
2. Meýdan effekti. MDÝ-strukturalar. MDÝ- strukturalaryň sygymy.

5.2. MESELE ÇÖZMEKLIK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

1. Ýarymgeçirijiniň göwrüm zarýadynyň üstki gatlagynda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy:

$$\begin{aligned}n &= n_i e^{\beta(\varphi + \varphi_b)}; \\p &= n_i e^{-\beta(\varphi + \varphi_b)},\end{aligned}$$

Bu ýerde $\beta = \frac{q}{kT}$, φ_b - göwrüm potensialy, şu aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$\varphi_b = \varphi_T \ln\left(\frac{N}{n_i}\right).$$

Bu ýerde N – ýarymgeçiriji esasyň (podložkanyň) göwrümünde garyndy atomlarynyň konsentrasiýasy.

2. Elektronlaryň n_s we deşikleriň p_s üstdäki konsentrasiýasy.

$$\begin{aligned}n_s &= n_i e^{\beta\varphi_s} \\p_s &= n_i e^{-\beta\varphi_s}\end{aligned}$$

Bu ýerde φ_s – üst potensialy.

3. Ýarymgeçirijiniň üst geçirijiligi.

$$\sigma_s = q(n_s \mu_n + p_s \mu_p)$$

4. Debaý uzynlygy (aralygy) ýa-da elektrik meýdanynyň ekranlanma uzynlygy: – hususy ýarymgeçirijiler üçin

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT}{q^2 n_i}},$$

– garyndyly ýarymgeçiriji üçin

$$L_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_s kT}{q^2 N}},$$

- geçirijiligiň görnüşiniň inwersiýasy bolan ýagdaýynda

$$L_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s kT}{q^2 N^*}},$$

Bu ýerde N^* - ýarymgeçirijide esasy bolmadyk zarýadlaryň konsentrasiýasy.

5. Ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda zarýadyň dykyzlygy.

Ýarymgeçirijiniň (p-görnüşli) üstki gatlagynda zarýadyň dykyzlygy Q_s , umumy görnüşde ýarymgeçirijiniň göwrüm zarýady gatlagynda zarýadyň dykyzlygynyň Q_B we ýarymgeçirijiniň inwersiýa gatlagynda Q_n hereketli zarýadlaryň dykyzlygynyň jemine deňdir, ýagny:

$$Q_s = Q_B + Q_n.$$

6. Ýarymgeçirijiniň zarýda garyplaşan böleginde zarýadyň dykyzlygy Q_B :

$$Q_B = -qNW,$$

Bu ýerde W - güýçli inwersiýa ýagdaýynda MDP – strukturanyň üstki böleginde göwrüm zarýady gatlagynyň galyňlygy bolup, aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$W = \sqrt{\frac{4\varepsilon_0\varepsilon_s\varphi_b}{qN}}.$$

7. MDÝ-strukturanyň differensial sygymy:

$$C = \frac{C_d C_s}{C_d + C_s},$$

Bu ýerde C_d – MDÝ-strukturanyň dielektrik gatlagynyň udel sygymy,

$$C_d = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_d}{d},$$

ε_d – MDÝ-strukturanyň dielektrik gatlagynyň dielektrik syzyjylygy; d – MDÝ-strukturanyň dielektrik gatlagynyň galyňlygy; C_s – ýarymgeçirijiniň göwrüm zarýady gatlagynyň udel sygymy,

$$C_s = \frac{dQ_s}{d\varphi_s}.$$

8. MDÝ-strukturanyň zatworyna berlen naprýaženiýanyň paýlanyşy:

$$V_z = V_d + \varphi_s + V_{tz},$$

Bu ýerde V_d – dielektrik gatlagynda naprýaženiýanyň çökmesi,

$$V_d = \frac{|Q_s|}{C_d},$$

V_{tz} – tekiz zonalarda naprýaženiýa,

$$V_{tz} = \varphi_{my} - \frac{Q_{ss}}{C_d},$$

Bu ýerde Q_{ss} – dielektrik-ýarymgeçiriji araçäkde zarýadyň dykyzlygy;

$q\varphi_{MY}$ - elektronynyň metaldan we ýarymgeçirijiden çykyş işleriniň tapawudy; kremniý-kremniý oksi-metal (Al- SiO₂-Si) strukturasy üçin φ_{MY} formula bilen hasaplanylýar:

$$\varphi_{MY} = 3,2 - (3,25 + 0,55 \pm \varphi_b),$$

Bu ýerde «+» alamaty p-geçirijilikli ýarymgeçirijiler üçin we «-» alamaty n-geçirijilikli ýarymgeçirijiler üçin peýdalanylýar.

9. MDÝ-tranzistorlaryň porog naprýaženiýasy;

– n-kanally tranzistorlar üçin:

$$V_{ic} = V_{tz} + 2|\varphi_b| + \frac{Q_B}{C_d},$$

- p-kanally tranzistorlar üçin:

$$V_{ic} = V_{tz} - 2|\varphi_b| - \frac{Q_B}{C_d}.$$

5.3. MESELE ÇÖZMEGİŇ MYSALLARY

1-nji mesele. Otag temperaturasynda $T=300$ K, udel garşylygy $\rho=15$ Om'sm bolan kremniý ýarymgeçirijisinde ekranlanmanyň Debaý uzynlygyny hasaplaň we elektrik meýdanynyň täsiriniň aralaşýan çuňlygy bilen deňeşdiriň.

Çözülişi

Ýarymgeçirijilerde Debaý aralygy, potensialyň kiçi kT/q oýandyrylmasynda elektrik meýdanynyň ýarymgeçirijä aralaşmak çuňlygyny häsiýetlendirýär:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT}{q^2 n_i}}$$

Sebäbi hususy kremniýde $n_i=2,8 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $L_D=2,5 \cdot 10^{-5} \text{ sm}=0,25 \text{ mkm}$. Naprýaženiýanyň uly bahalarynda, ýarymgeçirijide elektrik meýdanynyň aralaşyş çuňlugy W adaty ýagdaýda Debaý uzynlygundan örän uludyr, ýagny

$$\varphi_b \gg \frac{kT}{q} \quad \text{we} \quad \frac{W}{L_D} = \sqrt{\frac{2\varphi_b}{\left(\frac{kT}{q}\right)}} \gg 1$$

2-nji mesele. Udel garşylygy $\rho=1$ Om'sm bolan kremniý ýarymgeçiriji nusgasynda üst potensialynyň $\varphi_s=0,3$ W; $-0,2$ W; $-0,5$ W; $-0,9$ W bahalarynda, üstky gatlakda elektronlaryň we deşikleriň (n_s we p_s) göwrüm konsentrasiýasyny hasaplamaly.

Çözülişi

Klassiki ýagdaýda elektronlaryň we deşikleriň üstleýin konsentrasiýasy n_s we p_s aşakdaky formulalar bilen aňladylýar:

$$n_s = n_0 e^{\beta \varphi_s} \quad \text{we} \quad p_s = n_0 e^{-\beta(\varphi_s + 2\varphi_0)}$$

Zerur häsiýetnamalary hasaplalyň:

$$n_0 = \frac{1}{q\mu_n\rho_n} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 6,1 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-3}$$

$$2\varphi_0 = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} = 0,65 \text{ eW}$$

Elektronlaryň we deşikleriň üstleýin konsentrasiýasynyň (n_s we p_s) alnan bahalaryny tablisada ýazalyň:

$\varphi_s, \text{ eW}$	0,3	-0,2	-0,5	-0,9
$n_s, \text{ sm}^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{20}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
$p_s, \text{ sm}^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$6,5 \cdot 10^{19}$

Zarýad geçirijileriniň hususy konsetrasiýasyny elektronlaryň we deşikleriň üstleýin konsentrasiýasynyň alnan n_s we p_s bahalary bilen deňeşdirip, üstün dürli ýagdaýlary üçin alarys: 1 – elektronlara baýlaşmagy, 2 – elektronlara garyplaşmagy, 3 – gowşak inwersiýa, 4 – güýçli inwersiýa.

3-nji mesele.

Akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a=10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bolan p- görnüşli geçirijilikli kremniý nusgasynyň üstünde döredilen, galyňlygy 0,1 mkm bolan SiO_2 okis we alýuminiý metal gatlaklary bolan MDP-strukturalarda, SiO_2 okis gatlagy bilen Si plastinasynyň araçäginde ýüze çykýan zarýadyň dykzlygyny Q_{ss} hasaplaň. Tekiz zonalaryň naprýaženiýasy 2,3 W deňdir.

Ýokaryda seredilen MDÝ – kondensatoryň zatworyna ululygy woltuň ýüzden bir näçe üleşüne deň bolan, naprýaženiýa berilsin: Haçan-da tekiz zonalaryň naprýaženiýasy $W_{tz}=1,3 \text{ W}$ bolan ýagdaýynda, göwrüm zarýadynyň garyplaşan gatlagy Q_B bilen baglanyşykly zarýadyň dykzlygyny we kremniýniň üstüne gysylyp çykarylan hereketli zarýadyň dykzlygyny (Q_n) tapyň. Bu pribor belli bir derejede ýokary temperaturada işleýär. Fiziki ululyklaryň berlen bahalary: $\epsilon_d=4$; $\varphi_T=0,026 \text{ W}$.

Çözülişi

Tekiz zonalaryň naprýaženiýasy formula bilen kesgitlenilýär:

$$V_{n3} = \varphi_{MII} - \frac{Q_{ss}}{C_d} \quad (1)$$

(1) formuladan,

$$Q_{ss} = C_d (\varphi_{MII} - V_{n3}) \quad (2)$$

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{10^{-5}} = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

Çykyş işiniň tapawudyny hasaplalyň:

$$\Phi_{mý} = 3,2 - (3,25 - 0,55 + \varphi_T \ln (N_a n_i)) = 0,89 \text{ eW}.$$

Zarýad äkidijilere garyplaşan gatlakda zaýadyň dykzlygy:

$$Q_{ss} = 11,29 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2,$$

hereketli zarýadyň dyklyzlygy:

$$Q_n = Q_{ss} - Q_B = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2.$$

4-nji mesele. Akseptorlaryň konsentrasiýasy $N_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý nusgasy (plastinasy) esasynda ideal dielektrik gatlakly MDP-kondensator döredilen. Dielektrik gatlagynyň galyňlygy 100 nm. Metaldan we ýarymgeçirijiden elektronlaryň çykyş işiniň tapawudy $\varphi_{m\dot{y}} = -0,9 \text{ eW}$. Ýarymgeçiriji bilen metal gatlagynyň araçägindäki zarýadyň dyklyzlygy $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^{-2}$. Garyplaşan göwrüm zarýadynyň gatlagynyň maksimal galyňlygyny W_{max} , dielektrik gatlagynyň sygymyny, göwrüm zarýdy gatlagynyň zarýadyny ($Q_s = Q_B$), MDÝ-kondensatoryň porog naprýaženiýasyny we minimal sygymyny hem-de tekiz zonalaryň naprýaženiýasynyň täsirini hasaba alyp, porog naprýaženiýasyny hasaplaň.

Çözülişi

Zarýadlara garyplaşan göwrüm zarýdy gatlagyň maksimal galyňlygyny W_{max} kesgitlemek üçin, ilki bilen göwrüm potensialynyň ululygyny hasaplalyň:

$$\varphi_b = \varphi_T \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = 0,026 \ln\left(\frac{10^{15}}{1,5 \cdot 10^{10}}\right) = 0,29 \text{ W}.$$

Onda

$$W_{max} = 2 \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d \varphi_b}{q N_a} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,87 \text{ mkm},$$

dielektrik gatlagynyň sygymy:

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d} = 3,45 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

Zarýadlara garyplaşan gatlagyň zarýadyny hasaplalyň:

$$Q_B = Q_s = -q N_a W_{max} = 1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2,$$

Bu ýerden porog naprýaženiýasynyň ululygy:

$$V_{nop} = 2\varphi_b - Q_s/C_d = 0,98 \text{ eW}.$$

Ýarymgeçirijiniň göwrüm zarýady gatlagyň sygymy:

$$C = C_s = \varepsilon_0 \varepsilon_s / W_{max} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2,$$

göwrüm zarýady gatlagy bar bolanda MDÝ-strukturalaryň umumy sygymy:

$$C_{min} = \frac{C_d C_s}{C_d + C_s} = 0,89 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

Tekiz zonalaryň naprýaženiýasyny hasaba alyp porog naprýaženiýasyny kesgitläliň:

$$V_{por} = \varphi_{MP} + 2\varphi_b - \frac{Q_{ss} + Q_s}{C_d} = -2,24 \text{ W}.$$

5-nji mesele. Şekili döretmek funksiýasyny ýerine ýetirýän, üstki gatlagynda zarýad gatnaşykly pribor (PZS) döredilen, udel garşylygy 12 Om'sm bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý nusgasynda esasy bolmadyk zarýadlara zerur bolan ýaşaýyş wagtyny τ_0 hasaplaň, haçan-da ýylylyk generasiýasynyň paýyna detektirlenen porog zarýadynyň 5% -den köp bolmadyk bölegi düşýän bolsa. Zarýad gatnaşykly pribor (PZS) hökmünde ölçegi 5 x 5 mkm bolan kwadrat zatworly MDÝ-struktura peýdalanylýar.

Şekiliň ülüşi üçin detektirlenýän zarýadyň porog bahasy 2500 elektron bolup, her 10 millisekuntndan her bir ülüşiň zarýady sanalýar we nola öwrülýär. MDÝ-strukturanyň inwersiýa gatlagynda, ýylylyk deňagramlygynda zarýadlaryň üst dykzlygy 10^{13} elektron/sm² deňdir. Elektronlaryň ýylylyk generasiýasy (oýandyrylmasy) wagta bagly eksponensial funksiýa bilen ýazylýar.

$$Q(t) = Q_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) \right]$$

Bu ýerde Q_0 - ýylylyk deňagramlygy ýagdaýynda her bir zatworda elektronlaryň mukdary; $Q(t)$ - generirlenýän elektronlaryň mukdary; τ_a - üst generasiýasynyň häsiýetlendiriji (harakteristiçeskiý) wagty, τ_0 we τ_a ululykaryň arasyndaky baglanşyk şeýle görnüşe eýedir:

$$\tau_0 = \frac{n_i}{2N_a} \tau_a$$

Çözülişi

Ýylylyk deňagramlyk ýagdaýynda her bir zatworda $10^{13}(5 \cdot 10^{-4})^2 = 2,5 \cdot 10^6$ elektron ýerleşýär. Detektirlenýän porog zarýadynyň ululygy 2500 elektrona deňdir, emma ýylylyk generasiýasy esasynda döreýän elektronlaryň mümkin bolan sany, her bir zatwor üçin $2500 \cdot 0,05 = 125$ deňdir. Berlenlere esaslanyp:

$$2,5 \cdot 10^6 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) \right] = 125,$$

deňligi çözüp alarys $t/\tau_a = 5 \cdot 10^{-5}$. $t = 10^{-2}$ s generasiýa wagty üçin, zerur bolan üstdeki generasiýanyň häsiýetlendiriji wagtyny alarys,

$$\tau_a = \frac{10^{-2}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2 \cdot 10^2 \text{ s}$$

Onda udel garşylygy 12 Om'sm ($N_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) bolan kremniý ýarymgeçirijisi üçin alarys:

$$\tau_0 = \frac{1,45 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 10^{15}} \cdot 2 \cdot 10^2 = 1,45 \text{ ms.}$$

Bu meseläniň netijesinden görnüşi ýaly, üst zarýad strukturalarynda (PZS) üst generasiýasynyň häsiýetlendiriji wagty τ_a esasy bolmadyk zarýad geçirijileriniň ýaşaýyş wagtyndan τ_0 örän uludyr.

5.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇIN MESELELER

1. Göwrüm zarýady gatlagynda zarýadyň Q_B , üst potensialynyň ϕ_s we uly inwersiýa ýagdaýynda ýarymgeçirijiniň üstünde elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň $E(x=0)$ akseptor garyndysynyň konsentrasiýasyna baglylygyny kesgitläň. Akseptor atomlarynyň konsentrasiýasynyň 10^4 -den 10^{17} cm^{-3} çenli üýtgände alnan baglanşygy grafiki şekillindiri.

Jogaby:

$$Q_B = \left(4q\varepsilon_0\varepsilon_s N_a \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \varphi_s = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}; \quad E(x=0) = \left(\frac{4N_a kT}{\varepsilon_s \varepsilon_0 q} \cdot \ln \frac{N_a}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

2. Al-SiO₂-Si MDÝ – struktura p-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçiriji nusgada döredilen. Ýarymgeçirijide hususy zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$, göwrüm potensialynyň ululygy 0,25 eW bolanda zarýadyň dykzlygyny Q_B hasaplaň.

Jogaby: $Q_B = - 6,18 \cdot 10^9 \text{ Kl/sm}^2$.

3. Akseptoryň konsentrasiýasy $N_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý plastinasynda MDÝ – struktura döredilen. Strukturanyň oksid gatlagynyň galyňlygy $d = 0,2 \text{ mkm}$, zatwor alýuminiýden taýýarlanylýan. Haçan-da zatwora käbir ululykdaky zarýad berilende, kremniýniň üstünde galyňlygy $W = 0,65 \text{ mkm}$ bolan göwrüm zarýadynyň gatlagy döreýär. Zarýada garyplaşma effektiniň netijesinde üstde güýjenmesi $E = 104 \text{ W/sm}$ bolan elektrik meýdany döreýär. MDÝ-struktura ideal diýip kabul edip, hasaplamaly: a) kremniý nusganyň üstündäki potensialy; b) korpus bilen zatworyň arasyndaky naprýaženiýany (bu naprýaženiýanyň alamaty nämäni görkezýär?); w) seredilýän ýagdaý üçin idusirlenen hereketli zarýadyň dykzlygy $Q_n = 0 \text{ Kl/sm}^2$ diýip, porog naprýaženiýasyny.

Jogaby: a) $\varphi_s = 0,324 \text{ W}$; b) $V_{zk} = 0,943 \text{ W}$; B) $V_{por} = 1,4 \text{ W}$.

4. Diňe çykyş işleriniň tapawudyna bagly bolan Al-SiO₂-Si sistema üçin, tekiz zonalaryň naprýaženiýasyny hasaplaň. Otag temperaturasynda $T = 300\text{K}$, p-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji nusgasynda deşikleriň konsentrasiýasy $5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$.

Üstdäki zarýadyň konsentrasiýasy hasaba alynmaýar.

Jogaby: $V_{t\text{ zona}} = - 0,93 \text{ W}$.

5. P-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji plastinasynyň üstünde MDÝ- struktura döredilen. Strukturanyň zatwory alýuminiden taýýarlanylýp, akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ deň, oksid gatlagynyň galyňlygy $d = 120 \text{ nm}$. Eger-de üst zarýadynyň dykzlygy $4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$ bolanda, porog naprýaženiýasyny hasaplaň.

Jogaby: $V_{porog} = -1,46 \text{ W}$.

6. Akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji plastinasynyň üstünde MDÝ- strukturasy döredilen. MDÝ- strukturanyň zatwory alýuminiýden taýýarlanylýp, oksid gatlagynyň galyňlygy $d = 1,2 \text{ mkm}$. Okisel-ýarymgeçiriji araçäginde üst zarýadynyň dykzlygy $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$ deň. Porog naprýaženiýasynyň ululygyny kesgitläň.

Jogaby: $V_{porog} = - 32,18 \text{ W}$.

7. Donor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_d = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bolan n-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji plastinasynyň üstünde MDÝ- strukturasy döredilen. MDÝ- strukturanyň zatwory alýuminiýden taýýarlanylýp, oksid gatlagynyň galyňlygy $d = 100 \text{ nm}$ we porog naprýaženiýasynyň ululygy $-2,5 \text{ W}$. Strukturanyň üstünde zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasyny görkezýän Q_{ss}/q ululygyny bahasyny kesgitläň.

Jogaby: $Q_{ss}/q = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$.

8. Akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçiriji plastinasynyň üstünde oksid gatlagynyň galyňlygy $d = 112 \text{ nm}$ bolan MDÝ-strukturasy döredilen. Ýokary ýygylkda kiçi signal iş ýagdaýynda (režiminde), $V_z = 3 \text{ W}$ naprýaženiýada (naprýaženiýa, V_{nz} bilen gabat gelyär) we hemişelik inwersiýa režiminde $\phi_s = 0,52 \text{ W}$ potensialda maksimal udel sygymy 30 nF/sm^2 deňdir. Hasaplaň: a) göwrüm zarýadynyň maksimal galyňlygy $W = 1,17 \text{ mkm}$ bolan ýagdaýynda porog naprýaženiýany we degişli minimal sygymy C_{min} ; b) oksid gatlagynda zarýadyň dykzlygyny Q_{ss} ; w) göwrüm zarýady gatlagynda, inwersiýa gatlagynda, metal zatworda $V_z = 0 \text{ W}$ bolanda okis gatlagynda zarýadyň dykzlygyny. Metal-ýarymgeçiriji geçişde $\phi_{m\dot{y}} = -0,3 \text{ eW}$ deň.

Jogaby: a) $V_{porog} = -2,17 \text{ W}$, $C_{min} = 8,9 \cdot 10^{-9} \text{ F/sm}$; b) $Q_{ss} = 8,1 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$;

w) $-9,36 \cdot 10^{-9} \text{ Kl/sm}^2$; $-6,5 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$; $-5,0 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$; $-6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Kl/sm}^2$.

9. MDÝ-kondensatorlary akseptor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_a = 10^{14}$; 10^{15} u 10^{16} sm^{-3} bolan ýarymgeçiriji plastinalaryň üstünde döredilen. Görkezilen üç konsentrasiýanyň her biri üçin hasaplaň: a) göwrüm zarýady gatlagynyň maksimal galyňlygyny; b) $\phi_{mp} = -1,0 \text{ W}$; $C_{min} = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$; $d = 100 \text{ nm}$; $Q_{ss} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$ diýip hasap edip, porog naprýaženiýasyny; Jogaby: a) $W_m = 19$; 2; $0,289 \text{ nm}$; 6) $V_{porog} = -60$; $-248,1$; -942 mW .

10. Položitel zarýadyň dykzlygynyň aşakda görkezilen paýlanyşlary üçin tekiz zonalaryň naprýaženiýasyny hasaplaň: a) dykzlygy $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Kl/sm}^2$ bolan položitel zarýad okis gatlagyna keseleýin deňölçegli paýlanan; b) zatwordan kremniý esasa çenli aralygyň ýarysynyň çäginde nol dykzlykly basgançaklaýyn paýlanan we ýarymgeçiriji bilen okis gatlagynyň galan aralygynda (araçäginde çenli) dykzlygy $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Kl/sm}^2$ bolan položitel zarýad hemişelik dykzlykda; w) zatworda nol dykzlykdan başlap, araçäkinde $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Kl/sm}^2$ dykzlyga çenli göniçyzykly paýlanan ýagdaýynda; Seredilýän strukturada oksid gatlagynyň galyňlygy 80 nm we kremniý ýarymgeçiriji nusgasynyň otnositel dielektrik syzyjlygy $3,9$ deňdir.

Jogaby: a) $V_{tz} = 44,51 \text{ mW}$; b) $V_{tz} = 44,51 \text{ mW}$; W) $V_{tz} = 44,51 \text{ mW}$.

11. Alýuminiý zatworly MDÝ-kondensatorlarda ýüze çykýan deşikleriň hereketli zarýadynyň maksimal üst dykzlygyny Q_p hasaplaň, haçan-da zatwora amplitudasy 10 W bolan naprýaženiý impulsy berlende we araçäkinde naprýaženiýa az bolanda 2 W deň bolanda. MDÝ-strukturanyň esasy (podloždasy) donor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ bolan n-geçirijilikli kremniý bolup, okis gatlagynyň galyňlygy 100 nm . Kondensatorda $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Kl/sm}^2$; $\phi_{m\dot{y}} = -0,3 \text{ eW}$. Jogaby: $Q_p = 2,32 \cdot 10^{-7} \text{ Kl/sm}^2$.

12. p-geçirijilikli kanally MDÝ-tranzistor donor garyndysynyň konsentrasiýasy $N_d = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bolan n-görnüşli geçirijilikli kremniý plastinasynyň üstünde döredilen. Zatwor alýuminiýden taýýarlanylyp, zatworyň aşagyndaky dielektrik galyňlygy $d = 150 \text{ nm}$ bolan kremniý okisi gatlagydyr. Araçäkinde zarýadyň dykzlygy $Q_{ss} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$, $\phi_{m\dot{y}} = -0,25 \text{ eW}$. W , V_{tz} we V_{porog} ululyklaryň bahasyny hasaplamaly.

Jogaby: $W = 0,3 \text{ mkm}$; $V_{tz} = -1,64 \text{ W}$; $V_{porog} = -4,424 \text{ W}$.

13. N – kanally MDÝ- tranzistor şu aşakdaky häsiýetnamalara eýedir: $N_a = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$; $\phi_{m\dot{y}} = -0,95 \text{ eW}$. Okis gatlagynyň galyňlygy $d = 100 \text{ nm}$. Hasaplaň: a) porog naprýaženiýasyny; b) porog naprýaženiýasyny, haçan-da p – kanally MDÝ- tranzistor donoryň konsentrasiýasy $N_d = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ kremniý plastinasynda dörewdilen, $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$; Okis gatlagynyň galyňlygy $d = 100 \text{ nm}$; bu ýagdaýda Ferminiiň derejesiniň üýtgemesini E_f hasaba almaly (qE_f häsiýetnamanyň üýtgemesi $0,407 \text{ eW}$).

Jogaby: a) $V_{porog} = 2,33 \text{ W}$; b) $V_{porog} = -8,05 \text{ W}$.

14. Ýylylyk deňagramlygy we tekiz zona şertinde (režiminde) alýuminiý zatworly ideal MDÝ-struktura üçin zona diagrammasyny hasaplamaly we gurmaly, haçan-da ol a) udel garşylygy 1 Om·sm bolan n-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçirijisi esasynda taýýarlanylanda; b) udel garşylygy 1 Om·sm bolan p-görnüşli geçirijilikli kremniý ýarymgeçirijisi esasynda taýýarlanylanda. Jogaby: a) $V_{tz} = -0,17$ W; b) $V_{tz} = -0,9$ W.

15. MDÝ – struktura görnüşinde taýýarlanylýan, ölçegleri 100×100 mkm bolan kondensatoryň mümkin bolan maksimal sygymyny (C_1), şeýle ölçegdäki ters ugura meýdan berlen p-n-strukturadan taýýarlanylýan kondensatoryň sygymy (C_2) bilen deňeşdir. Işçi naprýaženiýany 10 W we okisiň proboý meýdanyny $8 \cdot 10^6$ W/sm diýip kabul etmeli. P-n-geçiş, garyndynyň konsentrasiýasy 10^{16} sm⁻³ bolan n-görnüşli geçirijilikli kremniý plastinasyna boruň diffuziýasy esasynda taýýarlanylýar. Jogaby: $C_1/C_2 = 22,8$.

16. Tekiz zonalaryň naprýažewniýasyny $V_{tz} = -0,5$ W diýip kabul edip, zaryada garyplaşan ýagdaýda MDÝ-strukturanyň doly sygymynyň ululygyny kesgitleň. Sygymyň gatnaşygynyň C/C_d naprýaženiýa baglylygynyň grafigini gurun. Okis gatlagynyň galyňlygyny 100 nm, kremniý ýarymgeçirijisi p-görnüşli we onuň udel garşylygy 1 Om·sm deňdir. Aşakdaky formulany peýdalanyp, tekiz zonalar režiminde C_{tz} sygymy hasaplamaly we sygymyň grafiginde bellemeli.

$$C_{tz} = \frac{C_d \frac{L_d}{\epsilon_0 \epsilon_s}}{C_d + \frac{L_d}{\epsilon_0 \epsilon_s}}.$$

17. N-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçiriji plastinasynda taýýarlanylýan, inwersiýa ýagdaýyndaky MDÝ-kondensatoryň aşakda getirilen ululyklaryny hasaplamaly we olaryň baglansygynyň grafigini gurmaly. $V_{pz} = -2$ W deň bolup, esasan hem okis gatlagynda hereketsiz zaryadyň Q_s bolmagy bilen kesgitlenilýär. Grafiklerde görkezilmeli: a) zona diagramması; b) sistemadaky doly zaryad; w) elektrik meýdany; g) potensial. Potensialy hasap etmegiň derejesini, ýarymgeçiriji plastinanyň içinden hasaplamaly.

18. Haçan-da $n_s = 10N_a$ bolanda, φ_s potensialyň φ_p potensialdan 58 mW uludygyny görkeziň.

19. Kremniniň göwrümünde potensialy nola deň hasap edip, ideal MDÝ-strukturanyň, zaryada garyplaşan režiminde potensialyň paýlanyşynyň aňlatmasyny almaly. Ideal MDÝ-strukturanyň, zaryada garyplaşan režimini üst potensialynyň φ_s we göwrüm zaryadynyň giňliginiň W funksiýasy hökmünde seretmeli. Koordinatalar başlangyjyny ($x = 0$) okisel-kremniý araçäkde ýerleşdirip, meseläni p- görnüşli geçirijilikli kremniý üçin çözmeli.

Jogaby: $\varphi(x) = \varphi_s \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2, 0 < x < W.$

6. P-N- GEÇIŞLI WE ŞOTTKI PÄSGELÇILIKLI (BARIÝERLI) STRUKTURALAR. DIODLAR.

6.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Şottki baryeri. Şottki baryeriniň zona diagrammasy. Şottki baryeriniň wolt amper häsiýetnamasy.
2. Elektron-deşikli p-n-geçiş.

6.2. MESELE ÇÖZMEKLİK ÜÇİN ESASY FORMULALAR

1. Birölçegli ýakynlaşmada Puassonyň deňlemesi.

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0}.$$

2. Ýarymgeçirijilerde termodinamiki çykyş işi:

n-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçirijiler üçin:

$$\Phi_n = -F = \chi + \frac{E_g}{2} - \varphi_{0n}$$

p-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçirijiler üçin:

$$\Phi_p = -F = \chi + \frac{E_g}{2} - \varphi_{0p}$$

F – Ferminiň energiýasy, χ – elektron srodstwowy, E_g – gadagan zonanyň giňligi, φ_{0n} , φ_{0p} – ýarymgeçirijide Ferminiň derejesiniň göwrüm ýagdaýy.

3. Metal-ýarymgeçiriji sepinde potensial päsgelçiligiň beýikligi:

$$\psi_{ms} = \Delta\varphi_{ms}/q = (\Phi_{Me} - \Phi_{\psi})/q$$

4. Göwrüm zarýady gatlagynyň giňligi:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\psi_{ms} - V_g)}{q \cdot N_d}},$$

bu ýerde V_g – goýulan naprýaženiýanyň ululygy, N_d – garyndynyň konsentrasiýasy.

5. p-n-geçişiň potensial päsgelçiliginiň beýikligi:

$$\Delta\varphi_{np} = \Phi_p - \Phi_n = \varphi_{p0} + \varphi_{n0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

6. Ideal diodyň wolt-amper häsiýetnamasy:

$$j = j_s \left(e^{\frac{qV_G}{kT}} - 1 \right).$$

6.3. MESELE ÇÖZMEGIŇ MYSALLARY

1-nji mesele. Termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda, elektron geçirijilikli germaniý-altyn (n-Ge-Au) Şottki diodynda potensial päsgelçiligiň beýikligini φ_k tapyň. Ýarymgeçirijiniň udel garşylygy $\rho=1 \text{ Om}\cdot\text{sm}$.

Çözülişi

Çykyş işiniň sepdäki tapawydy $\Delta\varphi_{\text{mý}} = \Phi_{\text{Au}} - \Phi_{\text{Ge}} = \Phi_{\text{Au}} - \chi - E_g/2 + \varphi_0$.

Elektronyň hereket edijiliginiň $\mu_n = 3900 \text{ sm}^2/\text{Vs}$ bolýandygyny hasaba alyp:

$$N_D = \frac{1}{q\mu_n\rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 3900} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3} \text{ we}$$

$$\varphi_0 = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot \ln\left(\frac{1,6 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}}\right) \approx 1,7 \cdot 10^{-20} \text{ Dj} = 0,11 \text{ eW},$$

$$\Phi_{\text{Ge}} = 4 + 0,66/2 - 0,11 = 4,22 \text{ W}$$

$$\Delta\varphi_{\text{ms}} = \Phi_{\text{Au}} - \Phi_{\text{Ge}} = 5 - 4,22 = 0,78 \text{ eW}.$$

2-nji mesele. Deňagramlyk ýagdaýynda we daşky naprýaženiýa $U = 0,4 \text{ W}$, $U = -2 \text{ W}$ bolanda metal-ýarymgeçiriji n-Si-Pt Şottki diodynda garyplaşan gatlagyň giňligini hasaplaň. Kremniýniň udel garşylygy $\rho=0,1 \text{ Om}\cdot\text{Sm}$.

Çözülişi

Metel-ýarymgeçiriji Şottki diodlarynda zaryada garyplaşan göwrüm zaryadynyň giňligi W şu formula bilen hasaplanylýar:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0(\psi_{\text{ms}} - V_g)}{q \cdot N_d}},$$

Donor garyndysynyň derejesi: N_d :

$$N_d = \frac{1}{q\mu_n\rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 0,1} \approx 4,2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3},$$

$$\varphi_0 = kT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = 0,0259 \ln\left(\frac{4,2 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{10}}\right) \approx 0,38 \text{ eW},$$

$$\Phi_{\text{Si}} = \chi + E_g/2 - \varphi_0 = 4,05 + 1,12/2 - 0,38 = 4,23 \text{ eW}$$

$$\Delta\varphi_{\text{ms}} = \Phi_{\text{Pt}} - \Phi_{\text{Si}} = 5,3 - 4,23 = 1,07 \text{ эВ}; \psi_{\text{ms}} = 1,07 \text{ W}$$

Eger $U=0,4 \text{ W}$ bolanda:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (1,07 - 0,4)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{22}}} \approx 0,14 \text{ mkm}.$$

Eger $U=0,4 \text{ W}$ bolanda:

$$W = 0,22 \text{ mkm.}$$

Termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda:

$$W = 0,18 \text{ mkm.}$$

3-nji mesele. Elektron geçirijilikli arsenid galliý – altyn (n-GaAs-Au) Şottki päsgelçilikli dioda berlen daşky naprýaženiýanyň $U = + 0,3 \text{ W}$, $U = 0 \text{ W}$, $U = - 100 \text{ W}$ bahalarynda göwrüm zarýadynyň gatlagyndaky maksimal elektrik meýdanynyň E näçä deňdigini hasaplamaly. $N_d = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$.

Çözülişi

Şottki päsgelçiliginde elektrik meýdanynyň E we potensialyň φ koordinata x baglylygyny şeýle hasaplamak mümkin:

$$E = \frac{d\psi}{dx} = \frac{qN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (W - x);$$

Haçan-da $x = 0$ bolanda elektrik meýdany özüniň maksimal bahasyna eýe bolýar. Göwrüm zarýadynyň gatlagynyň giňligi öňki meseledäki ýaly hasaplanylýar:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\psi_{ms} - V_g)}{q \cdot N_d}}$$

$$\varphi_0 = kT \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) = 0,0259 \ln \left(\frac{10^{16}}{1,1 \cdot 10^7} \right) \approx 0,53 \text{ eV}$$

$$\Phi_{\text{GaAs}} = \chi + E_g/2 - \varphi_0 = 4,07 + 1,43/2 - 0,53 = 4,3 \text{ eV}$$

$$\Delta\varphi_{\text{ms}} = \Phi_{\text{Au}} - \Phi_{\text{GaAs}} = 5,0 - 4,3 = 0,7 \text{ eV}; \psi_{\text{ms}} = 0,7 \text{ W}$$

$$W(V = +0,3) = \sqrt{\frac{2 \cdot 13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (0,7 - 0,3)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}} \approx 0,24 \text{ mkm}$$

$$E(V = +0,3) = \frac{d\psi}{dx} = \frac{qN_d W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 0,24 \cdot 10^{-6}}{13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 3,3 \cdot 10^6 \text{ W/m}$$

$$W(V = 0) = \sqrt{\frac{2 \cdot 13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}} \approx 0,32 \text{ mkm}$$

$$E(V = 0) = \frac{d\psi}{dx} = \frac{qN_d W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 0,32 \cdot 10^{-6}}{13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 4,4 \cdot 10^6 \text{ W/m}$$

$$W(V = -100) = \sqrt{\frac{2 \cdot 13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (0,7 + 100)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}} \approx 3,8 \text{ mkm}$$

$$E(V = -100) = \frac{d\psi}{dx} = \frac{qN_d W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 3,8 \cdot 10^{-6}}{13,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 52 \cdot 10^6 \text{ W/m}$$

4-nji mesele. P-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýynda, elektronly we deşikli geçirijilikli germaniýde elektrik meýdanynyň E maksimal bahasyny we göwrüm zaryadynyň gatlagynyň giňligini (W_n we W_p) tapyň. $\rho_n = 10 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $\rho_p = 1 \text{ Om}\cdot\text{sm}$.

Çözülişi

N-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçirijide göwrüm zaryadynyň gatlagynyň giňligi şeýle kesgitlenýär:

$$W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\Delta\varphi_{np} - V)}{qN_D^2 \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

N_D we N_A -niň bahalaryny kesgitläliň:

$$N_D = \frac{1}{q\mu_n \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 10} = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$$

$$N_A = \frac{1}{q\mu_p \rho_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900 \cdot 1} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

$$\Delta\varphi_{mn} = \Phi_p - \Phi_n = \varphi_{p0} + \varphi_{n0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0,0259 \cdot \ln \left(\frac{3,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{29}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \right) = 0,18 \text{ W}$$

Bu ýerden W_n :

$$W_n = \sqrt{\frac{2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,18}{1,6 \cdot 10^{-19} (1,6 \cdot 10^{14})^2 \left(\frac{1}{3,3 \cdot 10^{15}} + \frac{1}{1,6 \cdot 10^{14}} \right)}} = 1,3 \text{ mkm}.$$

Değişlilikde, p-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçirijide göwrüm zaryadynyň gatlagynyň giňligi:

$$W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\Delta\varphi_{np} - V)}{qN_A^2 \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}} = 0,068 \text{ mkm}.$$

$$E_{\max} = \frac{qN_D W_n}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{qN_A W_p}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = 2,5 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{sm}}.$$

5-nji mesele. Daşdan berilýän naprýaženiýa $U = + 0,5 \text{ W}$ we $U = - 0,5 \text{ W}$ bolanda kremniý p-n - geçişden geçýän toguň ululygyny hasaplaň. Garyndynyň derejesi: $N_A=10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_D=10^{14} \text{ sm}^{-3}$, p-n-geçişiň meýdany $S = 1 \text{ mm}^2$.

Çözülişi

Ideal diodyň wolt-amper häsiýetnamasy formula bilen ýazylýar:

$$j = j_s \left(e^{\frac{qV_G}{kT}} - 1 \right)$$

P-n- geçiş üçin doýgun tok j_s şu formula bilen kesgitlenilýär:

$$j_s = \frac{q \cdot D_n \cdot n_{p0}}{L_n} - \frac{q \cdot D_p \cdot p_{n0}}{L_p}$$

Diffuziýa koeffisiýentini D Eýnşteýniň gatnaşygyndan tapýarys:

$$D = \mu \frac{kT}{q}$$

$$D_n = 39 \text{ sm}^2 / \text{s}, \quad D_p = 16 \text{ sm}^2 / \text{s}.$$

Diffuziýa uzynlygy L :

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}$$

$$\tau = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$L_n = 0,31 \text{ sm}, \quad L_p = 0,063 \text{ sm}.$$

Doýgun toguň dykzlygyny elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýalaryny hasaba alyp tapýarys:

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}; \quad p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$j_s = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ A} \cdot \text{sm}^{-2}.$$

Onda diodyň üstünden akýan göni we ters tok:

$$I_{(U=+0,5 \text{ w})} = 0,13 \text{ mA}; \quad I_{(U=-0,5 \text{ w})} = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ A}.$$

6-njy mesele. n-Ge – p-GaAs geterogeçişiň energetiki zona diagrammasyny hasaplaň we guruň. $N_{D,A} = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$.

Çözülişi

Ge we GaAs ýarymgeçirijileriň çykyş işini hasaplalyň:

$$\Phi = \chi + \frac{E_g}{2} + \varphi_0,$$

$\varphi_{0\text{ Ge}} = -0,16\text{ eV}$ we $\varphi_{0\text{ GaAs}} = -0,53\text{ eV}$ bolýandygyny hasaba alyp, germaniý-arsenid galliý sepindäki potensiallaryň tapawudy:

$$\varphi_k = 5,32 - 4,15 = 1,15\text{ eV}.$$

Geterogeçişde göwrüm zarýady gatlagynyň giňligi:

$$W = \sqrt{\frac{2\varphi_k N_{b1} \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{q N_{b2} (\varepsilon_1 N_{b1} + \varepsilon_2 N_{b2})}},$$

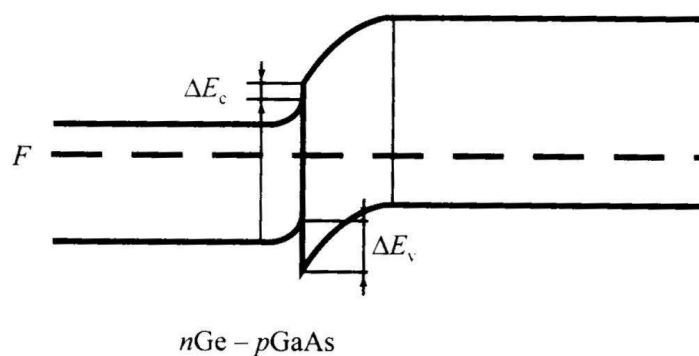
bu ýerde N_{b1} , N_{b2} we ε_1 , ε_2 – ýarymgeçirijilerde garyndynyň derejesi we dielektrik syzyjylyk.

$$W_{\text{Ge}} = W_{\text{GaAs}} = 0,28\text{ mkm}.$$

Dürli ýarymgeçirijileriň sepinde, geterogeçişde ýüze çykyan zonalaryň üzülmesiniň ululygyny tapalyň (3.1. surat):

$$\Delta E_C = \chi_{\text{GaAs}} - \chi_{\text{Ge}} = 0,07\text{ eV},$$

$$\Delta E_V = (\chi_{\text{GaAs}} + E_{g\text{GaAs}}) - (\chi_{\text{Ge}} + E_{g\text{Ge}}) = 0,84\text{ eV}.$$



6.1. surat. n-Ge – p-GaAs geterogeçişiň zona diagrammasy.

6.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇIN MESELELER

1. n-Si – Au Sottki barýerine daşdan berilýän naprýaženiýa $U = -5\text{ V}$ bolanda, metal-ýarymgeçiriji araçäkden $z = 1,2\text{ mkm}$ aralykda elektrik meýdany E we potensial φ näçä deň bolar? $\rho = 10\text{ Om}\cdot\text{sm}$.

Jogaby: $E = 1,9 \cdot 10^4\text{ V/sm}$, $\varphi = 2,9\text{ V}$.

2. Daşky naprýaženiýa $U = 0,5\text{ V}$ we $U = -0,5\text{ V}$ bolanda n-GaAs-Pt Sottki barýerindan akyp geçýän toguň dyklyzlygyny j tapyň. $\rho = 50\text{ Om}\cdot\text{sm}$.

Jogaby: ?

3. Göwrüm garşylygy $\rho = 2\text{ Om}\cdot\text{sm}$ bolan n-Ge – p-Ge p-n-geçişde potensial päsgelçiligiň beýikligini φ_k hasaplaň. Haçan-da berilýän daşky naprýaženiýa $U = 0,15\text{ V}$ – dan $U = -5\text{ V}$ çenli üýtgände p-n- giçişde (araçäkde) potensial barýeriň beýikligi nähili üýtgär. n-Ge – p-Ge p-n-geçişiň zona diagrammasyny çyzyň.

Jogaby: $\varphi_k (U = 0,15\text{ V}) = 0,05\text{ V}$; $\varphi_k (U = -5\text{ V}) = 0,7\text{ V}$.

4. Udel garşylygy $\rho = 10 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bolan n-Si - p-Si p-n-geçişde daşky naprýażeniýanyň göni ugura $U = 0,4 \text{ W}$ - dan ters ugura $U = -2 \text{ W}$ çenli üýtgemegi bilen, p-n-geçişiň araçäginden $z = + 0,2 \text{ mkm}$ aralykda elektrik meýdanynyň ululygy we ugury nähili üýtgär.

Jogaby: : $E_{(U= -0,4 \text{ W})} = 3,4 \cdot 10^3 \text{ W/sm}$; $E_{(U= +2 \text{ W})} = 1,4 \cdot 10^4 \text{ W/sm}$.

5. Gomozonaly $n^+ \text{-Si- p-Si- p-n}^+$ - geçişde daşdan berilen naprýażeniýa $U = - 1 \text{ W}$ bolanda, p-n-geçişiň araçäginden ýarymgeçirijiniň göwrümine tarap $\Delta z = 0,1 \text{ mkm}$ aralykdan, potensial päsgelçiligiň üýtgeýşini hasaplamaly. $\rho_n = 0,001 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $\rho_p = 4,5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$. p-n⁺- geçişiň zona diagrammasyny gurmaly.

Jogaby:

x, mkm	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
$\varphi(x)$, W	1,8	1,46	1,11	0,65	0,29	0,07	0,02

6. Otag temperaturasynda $T = 300 \text{ K}$ meýdany $S = 10^{-3} \text{ sm}^2$ we garyndylaryň konsentrasiýasy $N_D = N_A = 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ bolan birbada geçişli kremniý p-n – geçiş berilen. Haçan-da bu dioddan geçýän tok 1 mA deň bolanda, p-n – geçişde toplanan zaryadyň ululygyny we ters ugura berilen naprýażeniýanyň 0 dan – 10 W çenli üýtgeýän wagtyny hasaplaň.

Jogaby: $Q(0) = 9,73 \cdot 10^{-11} \text{ Kl}$, $Q(-10) = 4,23 \cdot 10^{-10} \text{ Kl}$. $t = 3,26 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.

7. OPTOELEKTRONIKA.

7.1. TEORIÝA SORAGLARY

1. Swetodiodlar. Ýarymgeçiriji lazerleri.
2. Fotokabuledijiler. p-n-geçişli fotodiodlar. MDÝ- fotokabuledijiler.

7.2. MESELE ÇÖZMEKLIK ÜÇIN ESASY FORMULALAR

Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň ýuwdülmagy:

$$W = W_0(1 - r)e^{-\alpha x},$$

bu ýerde r – ýagtylygyň serpikme koeffisiýenti.

Swetodiodyň ýagtylygynyň intensiwligi:

$$I(h\nu) = V^2(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{(h\nu - E_g)^2}{kT^2}}$$

Ýagtylyk şöhlesi düşmedik ýagdaýynda gün fotoelementiniň wolt-amper häsiýetnamasy:

$$I = I_d \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \text{ bu ýerde } U_T = \frac{kT}{q} - \text{temperatura bagly potensial.}$$

Ýagtylyk şöhlesi düşen ýagdaýynda gün fotoelementiniň wolt-amper häsiýetnamasy:

$$I = I_d \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) - I_f$$

7.3. MESELE ÇÖZMEGIŇ MYSALLARY

1-nji mesele. Göni ugura toguň ululygy $I = 50 \text{ mA}$ we potenciallaryň tapawudy $U = 2 \text{ W}$ bolanda tekiz GaAs swetodiodyň daşky elektrik kuwwatyny öwrüjilik effektiwligi $\eta = 1,5\%$ deň. Haca-da ýarymgeçiriji (GaAs)- howa araçäfinde ýagtylygyň serpilme koeffisiýenti $R = 0.8$, GaAs üçin döwürleme koeffisiýenti $n = 3,6$ bolanda swetodiodda generirlenýän optiki kuwwady P_i kesgitläň.

Çözülişi

Swetodiodyň ýüz tarapky üstünden şöhlelenýän ýagtylyk şöhlesiniň bölegi F we serpilme koeffisiýenti R şu aşakdaky formulalar bilen kesgitlenýär:

$$F = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right];$$

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

bu ýerde $P_0 = F P_i$ – daşky kuwwat (P_i – içki kuwwat);

$$P_0 = \eta I V;$$

$$P_i = \frac{\eta \cdot I \cdot V}{F};$$

$$\frac{1}{F} = \frac{4 \cdot (3,6)^2}{\left(1 - \left(\frac{2,4}{4,6} \right)^2 \right)} = 71,23$$

$$P_i = 0,015 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 71,23 = 107 \text{ mWt}.$$

2-nji mesele. Fotodiodyň esasy däl zarýad geçirijileriniň rekombinasiýa ýaşayyş wagty $\tau = 5 \text{ ns}$. Fotodioddan göni tok akan ýagdaýynda optiki çykyş kuwwaty $P_{o.k.} = 300 \text{ mWt}$. Haçan-da dioddan akýan tok 20 MGs we 100 MGs ýygylýk bilen modulirlenen bolanda, P_f çykyş kuwwatyny kesgitlemeli.

Çözülişi

Fotodiodyň çykyş kuwwaty şu formula bilen kesgitlenilýär:

$$P_f = \frac{P_{o.k.}}{\left(1 + \omega^2 \tau^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

bu ýerden

$$P_f(20) = \frac{300 \cdot 10^{-6}}{\left(1 + 400 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \right)^{\frac{1}{2}}} = 298 \text{ mWt},$$

Şuňa meňzeşlikde

$$P_f(100) = 291 \text{ mWt}.$$

3-nji mesele. Ideal fotodiod (kwant çykyşy bire deň bolan fotodiod) tolkun uzynlygy $\lambda = 0,8 \text{ mkm}$, kuwwaty $P = 10 \text{ mWt}$ bolan ýagtylyk şöhləsi bilen şöhlendirilýär. Haçan-da fotodiod fototok we foto EHG režiminde ulanylan ýagdaýlarynda, deňşililikde priboryň çykyşynda togy we naprýaženiýany hasaplamaly. Işçi temperatura $T = 300 \text{ K}$ bolanda, ters ugura elektrik meýdany berlen ýagdaýynda p-n-geçişden syzýan toguň ululygy $I_0 = 10 \text{ nA}$ deň.

Çözülişi

a) Fototok režiminde dioddan akýan tok:

$$I = -(I_0 + I_f);$$

I_f fototok deň:

$$I_f = R \cdot P,$$

R – kwant fotoduýjylyk [A/W_T]:

$$R = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} = \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c};$$

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} = \frac{r_e \cdot h \cdot \nu}{P},$$

bu ýerde r_e – fotodiod ýagtylandyrylanda emele gelyän elektronlaryň sany; r_p – fotodioda düşýän λ tolkun uzynlykly fotonlaryň sany. Fotodiodyň çykyşyndaky tok $I_f = 6,4$ mA.

b) Foto EHG režiminde: $I_f = 0$. Onda $I_f = I_0(\exp(qU/kT) - 1)$, $I_f \gg I_0$ bolýandygyny hasaba alyp:

$$V_{hh} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_f}{I_0}\right) = 0,345 \text{ W}.$$

$$P_f(100) = 291 \text{ mWt}.$$

4-nji mesele. Köpelme koeffisiýenti $M = 20$ bolan lawina fotodiody $\lambda = 1,5$ mkm bolan tolkun uzynlygynda işleýär. Berlen tolkun uzynlygynda, haçan-da 10^{10} foton/s ýagtylyk akymynda fotodiodyň fotoduýjylygy $R = 0,6$ A/Wt bolanda priboryň kwant çykyşyny we çykyş toguny hasaplamaly.

Çözülişi

Giriş optiki kuwwaty:

$$P = r_p \cdot \frac{hc}{\lambda} = 1,32 \cdot 10^{-9} \text{ Wt},$$

fototok

$$I_f = R \cdot P = 7,95 \cdot 10^{-10} \text{ A},$$

çykyş togy

$$I = M \cdot I_f = 15,9 \text{ nA},$$

$$r_e = \frac{I_f}{q} = 5 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1},$$

bu ýerden kwant çykyşy:

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} = 0,5.$$

5-nji mesele. Adaty göni ýagtylyk şöhesi bilen şöhlelendirinde kremniý fotoelementi ýaly özüni alyp barýan gün elementi berilen ($U > 0$). Otag temperaturasynda ýagtylyk şöhesi düşmedik (garaňky) ýagdaýynda elementiň häsiýetnamalary: $I_{0d} = 3,3$ nA; $\alpha = 1,3$ (ulanmagyň ideallık koeffisiýenti); $A = 1,7$ sm²; $r_i = 0,8$ Om (fotoelementiň içki gerşylygy). Gün elementi ýagtylandyrylanda çykyş ýüküniň (rezistiw garşylygyň) akýan tok $I_R = 36$ mA; $U_T = 0,026$ W. Kesgitlemeli:

a) çykyşdan tok akmaýan (ýüke birleşdirilmedik) ($I = 0$) ýagdaýynda U_{hh} naprýaženiýany;

- b) I tok bilen R_n ýük garşylygynyň arasyndaky özara baglanyşygy; bu toguň alamaty položitelmi ýa-da otrisatel?
- w) Çykyş ýükünde maksimal kuwwat berip biljek I_m , U_m , R_{nm} ululyklaryň bahalaryny hem-de degişli çykyş kuwwadyny.

Çözülişi

- a) Çykyşdan akýan tok nola deň bolan ýagdaýynda çykyş naprýaženiýasy U_{hh} formula bilen kesgitlenilýär:

$$U_{hh} = \alpha U_T \ln \left(\frac{I_R}{I_{0d}} + 1 \right) = 1,3 \cdot 0,026 \cdot \ln \left(\frac{36 \cdot 10^{-3}}{3,3 \cdot 10^{-9}} + 1 \right) = 0,55W$$

- b) Gün elementinde ýüze çykýan elektrigi hereketlendiriji güýç $U_i = -\frac{I}{R_n + r_i}$, bu ýerde R_n – gün elementiniň içki garşylygy r_i bilen yzygiderli birleşdirilen çykyş ýüküniň garşylygy. Çykyş ýükünde naprýaženiýanyň $U=IR_n$ bolýandygyny göz önünde tutup, tapalyň:

$$U = \alpha U_T \left(1 + \frac{r_i}{R_n} \right)^{-1} \ln \left(\frac{I_R + I}{I_{0d}} + 1 \right),$$

$$R_n = \frac{0,034}{-I} \ln \left(\frac{36 \cdot 10^{-3} + I}{3,3 \cdot 10^{-9}} + 1 \right) - 0,8,$$

bu ýerde $I < 0$ bolýandygy hasaba alnan.

- w) Çykyş ýükündäki kuwwat:

$$P = -IU = -CI \ln \left(\frac{I_n + I_m}{I_{0d}} + 1 \right) \approx -CI \ln \frac{I_n + I_m}{I_{0d}},$$

bu yerde

$$C = \alpha U_T \left(1 + \frac{r_i}{R_n} \right)^{-1}.$$

Haçan-da I boýunça onuň önümi nola öwürülýän bolsa çykyşda kuwwat maksimal baha eýedir:

$$\frac{dP}{dI} = 0 = -C \left[\ln \frac{I_n + I_m}{I_{0d}} - \frac{I_m / I_{0d}}{(I_n + I_m) / I_{0d}} \right].$$

Çykyşda kuwwadyň maksimal bolmak şertinden:

$$\ln \frac{I_n + I_m}{I_{0d}} = -\frac{I_m}{I_n + I_m}.$$

Bu ýerden tapýarys: $I_m = -33,52 \text{ mA}$; $R_{nm} = 12,9 \text{ Ohm}$; $U_m = -I_m R_{nm} = 0,43 \text{ W}$. Netijede alarys:
 $P_m = I_m U_m = 14,5 \text{ mWt}$.

7.4. ÖZBAŞDAK ÇÖZMEK ÜÇİN MESELELER

1. İçki optiki kuwwady P_i daşky berlen elektrik kuwwadynyň 30% -ne deň bolanda, tekiz GaAs swetodiodyň daşky kuwwady öwrüjilik effektivliginiň η bahasyny tapyň. GaAs ýarymgeçirijisi üçin ýagtylygynyň döwürleme koeffisiýenti $n = 3,6$.

Jogaby: $\eta = 0,0042$.

2. Otag temperaturasynda az garyndyly GaAs ýarymgeçirijisiniň gadagan zonasynyň giňligi $E_g = 1,43$ eW. Häçan-da ýarymgeçiriji materialy örän ýokary derejede garyndyly bolsa (wyröždeniýa ýüze çykýança), gadagan zonanyň inini 8% çenli kiçeldýän “derejeleriň guýrugy” emele gelýär. Az garyndyly we aşa ýokary derejede garyndyly GaAs swetodiodlaryň göýberýän şöhlesiniň tolkun uzynlyklarynyň tapawudyny kesgitläň.

Jogaby: $\Delta\lambda = 0,075$ mkm.

3. 0,9 mkm tolkun uzynlygynda p-n- geçişli fotodiodyň kwant çykyşy 50% deň. Fotodiodyň duýgurlygyny R , ýuwdulan optiki kuwwady P ($I_p = 1$ mA) we berlen tolkun uzynlygynda bir sekuntda ýuwdulan fotonlaryň sanyny r_p hasaplamaly.

Jogaby: $R = 0,36$ A/Wt, $P = 2,78$ mWt, $r_p = 1,26 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$.

4. $\lambda = 0,82$ mkm tolkun uzynlygynda kremniý lawina fotodiodynyň kopelme koeffisiýenti $M = 20$ deň, şol bir wagtyň özünde onuň kwant çykyşy 50% , garaňky ýagdaýdaky tok 1 nA. Berlen tolkun uzynlykda bir sekuntda, çykyşda (köpelme režiminden soňra) garaňky tokdan uly bolan toky döredip biljek gelip düşýän fotonlaryň sanyny kesgitlemeli r_p .

Jogaby: $r_p = 6 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$.

5. 5-nji meselede getirilen gün elementi üçin hasaplamaly:

a) Gün elementiniň wolt-amper häsiýetnamasynyň doýgunlyk koeffisiýentini K_d ;

b) Häçan-da $R_n = 2R_{nm}$ we $R_n = 0,5R_{nm}$ bolan ýagdaýyndaky çykyş ýükdäki naprýaženiýany we kuwwaty.

Jogaby: a) $K_d = 0,73$; b) $U_{1n} = 5,16 \cdot 10^{-1}$ W, $P_{1n} = 10,3$ mWt; $U_{2n} = 2,32 \cdot 10^{-1}$ W, $P_{2n} = 8,36$ mWt.

Umumy fiziki hemişelikler

Elektronyň zaryady,	$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$
Elektronyň dynçlykdaky massasy,	$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g}$
Bolsmanyň hemişeligi,	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Dj/K}$
Plankyň hemişeligi,	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Dj/s}; \hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Dj/s}$
Dielektrik syzyjylyk,	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
Ýagtylyk şöhlesiniň wakuumdaky tizligi,	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ km/s}$

Örän wajyp ýarymgeçirijileriň birnäçesiniň fiziki häsiýetnamalary

Häsiýetnamalar			Bellenilişi	Si	Ge	GaAs	InSb
Gadagan zonanyň giňligi, eW	300 K		E _g	1,12	0,66	1,43	0,18
	0 K			1,21	0,80	1,56	0,23
Zarýad geçirijileriň hereket edijiligi, Sm ² W ⁻¹ s ⁻¹	Elektronlar	T=300 K	μ _n	1500	3900	8500	78000
		T=77 K					2·10 ⁵
	deşikler	T=300 K	μ _n	600	1900	400	1700
		T=77 K					5000
Effektiw massa, m [*] /m ₀	elektronlar		m _{dn} [*]	1,08	0,56	0,068	0,013
	deşikler		m _{dp} [*]	0,56	0,35	0,45	0,6
Geçiş zonasynda derejeleriň effektiw dykzlygy, sm ⁻³	T=300 K		N _c	2,8·10 ¹⁹	1,04·10 ¹⁹	4,7·10 ¹⁷	3,7·10 ¹⁶
	T=77 K			3,6·10 ¹⁸	1,4·10 ¹⁸	5,8·10 ¹⁶	5,1·10 ¹⁵
Walent zonasynda derejeleriň effektiw dykzlygy, sm ⁻³	T=300 K		N _v	1,02·10 ¹⁹	6,11·10 ¹⁷	7,0·10 ¹⁸	1,16·10 ¹⁹
	T=77 K			1,4·10 ¹⁸	6,9·10 ¹⁸	9,8·10 ¹⁷	1,5·10 ¹⁸
Dielektrik hemişeligi			ε _s	11,8	16,0	13,2	17,7
Elektron srodstwasy			χ	4,05	4,00	4,07	4,60
Zarýad geçirijileriň hususy konsentراسیasy, sm ⁻³	T=300 K		n _i	1,6·10 ¹⁰	2,5·10 ¹³	1,1·10 ⁷	2,0·10 ¹⁶
	T=77 K			3·10 ⁻²⁰	1,4·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻³³	1,2·10 ¹⁰
Zarýad geçirijileriň ýaşayyş wagty, s			τ	2,5·10 ⁻³	1,0·10 ⁻³	1·10 ⁻⁸	1·10 ⁻⁸
Temperatura koeffisiýenti			α	2,4·10 ⁻⁶	5,8·10 ⁻⁶	5,8·10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻⁶
Gözenegiň hemişeligi, nm			a, b, c	5,43	5,65	5,65	6,48
Eremek temperaturasy, °C			T	1415	936	1238	525

EDEBIÝATLAR

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. TDNG. Aşgabat, 2007.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr. – Aşgabat. Ýlym, 2007.
3. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň ýurdy täzedan galkyndyrmak baradaky syýasaty. – Aşgabat. Türkmen döwlet neşirýaty gullugy. 2007.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 1t.- Aşgabat: Türkmenistanyň Ministrler Kabinetiniň ýanyndaky Baş arhiw müdirligi, Türkmenistanyň Prezidentiniň Arhiw gaznasy, 2008.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 2t.- Aşgabat: Türkmenistanyň Ministrler Kabinetiniň ýanyndaky Baş arhiw müdirligi, Türkmenistanyň Prezidentiniň Arhiw gaznasy, 2009.
6. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург. 2006.
7. Гуртов В. Твдотельная электроника. Учебное пособие. Москва. Техносфера. 2005.
8. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. Перевод с французского под редакцией Ермакова О. Н. Москва. Техносфера. 2006.
9. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника. Москва. Техносфера. 2004.
10. Барывин А. А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы. Москва. Физматлит. 2008.
11. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Твдотельная электроника. Москва. Наука. 1986.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В двух книгах. Москва. Мир. 1984.
13. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. Москва. Наука. 1986.
14. Гусева М. Б., Дубинина Э. М. Физические основы твердотельной электроники. Москва. Наука. 1986.
15. Игумнов Д. В., Костюнина Г. П., Громов И. С. Элементы твердотельной электроники. Москва. Наука. 1986.
16. Степанов И. В. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва. Наука. 1988.
17. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. Москва. Наука. 1987.
18. Бонч-Бруевич В. Я., Калашников С. Г. Физика полупроводников. Москва. Наука. 1990.
19. Лозовский В. Н., Константинова Г., Лозовский С. В. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность. Санкт-Петербург- Москва-Краснодар. Лань. 2008.
20. Зегрия Г.Г., Перел Б.И. Основы физики полупроводников. Москва. Физматлит. 2009.
21. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. Москва. Физматлит. 2008.
22. Nazarow N. Gaty jisimiň elektronikasy. Aşgabat. Magaryf. 2010.
23. Ökdirow A., Kulyýew T. Senagat elektronikasy. Aşgabat. Ýlym. 2005.
24. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. Москва. Высшая школа. 1975.
25. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Москва. Энергия. 1976.

MAZMUNY

Giriş

1. Kwant mehanikasynyň ülüşleri.
 - 1.1. Teoriýa soraglary.
 - 1.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 1.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 1.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
2. Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň statistikasy.
 - 2.1. Teoriýa soraglary.
 - 2.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 2.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 2.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
3. Diffuziýa we dreýf. Generasiýa we rekombinasiýa.
 - 3.1. Teoriýa soraglary.
 - 3.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 3.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 3.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
4. Ýarymgeçirijilerde kinetiki hadysalar.
 - 4.1. Teoriýa soraglary.
 - 4.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 4.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 4.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
5. Ýarymgeçirijilerde üst hadysalary. MDÝ-strukturalary.
 - 5.1. Teoriýa soraglary.
 - 5.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 5.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 5.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
6. P-n-geçişli we Şottki baryerli (päsgeçilikli) strukturalar. Diodlar.
 - 6.1. Teoriýa soraglary.
 - 6.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 6.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 6.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.
7. Optoelektronika.
 - 7.1. Teoriýa soraglary.
 - 7.2. Mesele çözmek üçin esasy formulalar.
 - 7.3. Mesele çözmegiň mysallary.
 - 7.4. Ozbaşdak çözmek üçin meseleler.

Umumy fiziki hemişelikler

Örän wajyp ýarymgeçirijileriň birnäçesiniň fiziki häsiýetnamalary

Edebiýatlar