

Лекция 3 Жартылай өткізгіштер физикасының негіздері

Жартылай өткізгіштердің құрылымы

Бордың атомдық моделі

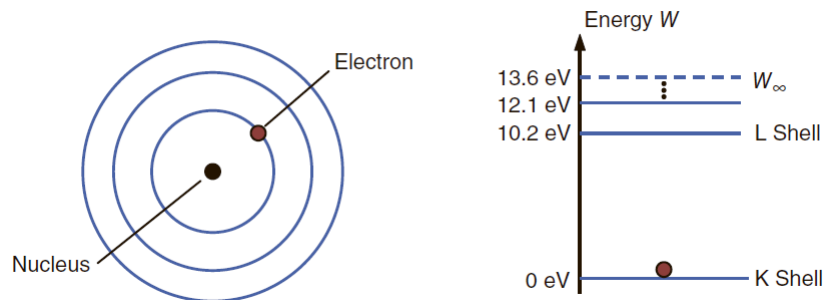
Жеке атомды қарастырайық. Бордың атомдық моделі бойынша атом ядро мен қабықтан тұрады. Ядрода протондар мен нейтрондар, ал қабықта ядроны айналып өтетін электрондар бар. Протондар $+q$ элементар зарядпен оң электр зарядталған, ал электрондар $-q$ зарядпен теріс зарядталған. Элементар зарядтың өлшемі $1,6 \cdot 10^{-19}$ сияқты. Ядродағы протондар саны электрондар санына тең болғандықтан (атомдық нөмір деп аталады) атом сыртқы жағынан электрлік бейтарап.

Біз білетін қарапайым атом – сутегі атомы (16-сурет). Оның атомдық нөмірі 1, сондықтан ядрода тек бір протон және қабықта бір электрон бар.

Нильс Бор электрондардың тек ядроға қатысты өте ерекше жолдармен («қабықтар» деп аталатын) айнала алатынын мойындады және мұны өзінің Бірінші постулатында анықтады.

Бордың бірінші постулаты:

Электрон үшін рұқсат етілген белгілі бір дискретті қабықшалар ғана бар.



Сурет 16 – Сутегі атомының құрылымы мен энергетикалық моделі

Бұл қабықшалардың әрқайсысы электронның сәйкес энергетикалық күйін көрсететін белгілі бір жол радиусын білдіреді. Раковиналар К, L, М және т.б әріптермен белгіленеді. 16-суретте сутегі атомының мүмкін болатын энергетикалық күйлері көрсетілген. Негізгі күйде электрон К қабатында орналасқан. Егер электрон L қабатына жылжытылса, онда 10,2 эВ (электрон вольт) энергия қажет. Электронды атомнан толық ажырату үшін (осылайша оны «шексіздікке» тасымалдау) 13,6 эВ W_∞ иондаушы энергияны пайдалану керек.

Бір қабықтан екіншісіне ауысу кезінде не болады? Бұл келесі постулатта сипатталған:

Бордың екінші постулаты:

Электронның бір қабықтан екіншісіне ауысуы электромагниттік сәулеленудің сәулеленуі немесе жұтылуы кезінде жүреді.

Бұл сәулеленудің f жиілігі келесі теңдеумен анықталады:

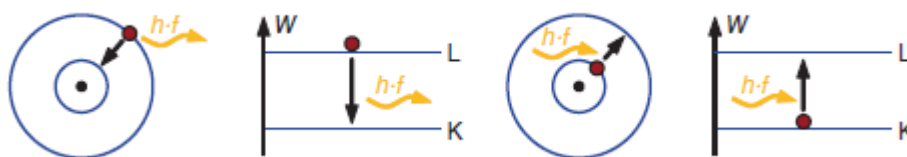
$$\Delta W = |W_2 - W_1| = h \cdot f$$

W_1 - тасымалдау алдындағы энергия, W_2 - тасымалдаудан кейінгі энергия, h - Планк тұрақтысы; $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$, f жиілігінен λ толқын ұзындығын анықтау үшін келесі теңдеу қолданылады:

$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

Мұндағы: c_0 - вакуумдегі жарық жылдамдығы, $c_0=299,792 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Бордың екінші постулатын жақсырақ түсіну үшін 17-суретті қараңыз: Сол жақ бөлігінде L қабатындағы электронның K қабатына қалай түсетіні көрсетілген. Осы арқылы бөлінетін энергия фотон түрінде жарық түрінде сәулеленеді. Бұл процесс жарық шығару деп аталады. Белгілі бір толқын ұзындығының («жарық бөлшектері») жарық пакеті фотон ретінде белгілі.

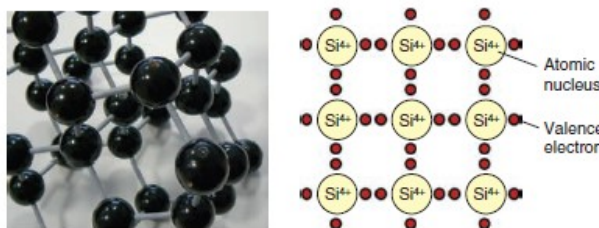


Сурет 17 – Жарықтың сәулеленуінің (сол жақта) және жұтылуының (оң жақта) схемалық бейнесі

Қарама-қарсы жағдай 17-суреттің оң жағында көрсетілген: жеңіл бөлшек электронға соғылып, «жұтылады». Бұл кезде бөлінетін энергия электронды K қабатынан L қабатына көтереді. Бұл процесс жарықтың жұтылуы деп аталады.

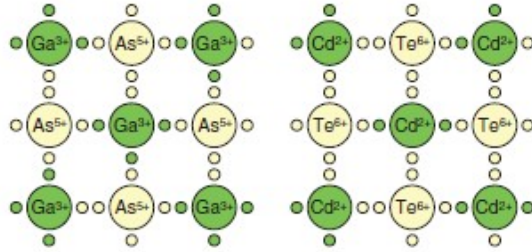
Кремний кристалы

Көрші атомдардың электрондары қозғалмайтын байланыстар жасағанда, онда тұрақты тор құрылымы пайда болуы мүмкін. Мұндай құрылымды кристалдық тор деп атайды. Кремниймен әрбір валенттік электрон көрші атомның электронымен байланыс жасайды. Осылай түзілген тор 17-суретте шар түрінде және екі өлшемді бейнелеу түрінде көрсетілген. Бұл жағдайда атом ядросы барлық ішкі қабықтарымен бірге шеңбер түрінде сызылады. Дұрыс белгілеу Si^{4+} , өйткені ядродағы 14 протон ішкі қабықтардағы 10 электронмен бірге 4X оң зарядты тудырады. Сонымен бірге әрбір Si атомдық ядросы сегіз валенттік электронмен қоршалғаны белгілі. Бұл асыл газ конфигурациясы деп аталады, өйткені олар сыртқы қабығында сегіз электроны бар асыл газ аргонымен салыстыруға болады.



Сурет 17 - Кремний кристалының құрылымы: сол жақтағы суретте сфералық модель, ал оң жақта екі өлшемді сурет көрсетілген

Күрделі жартылай өткізгіштер



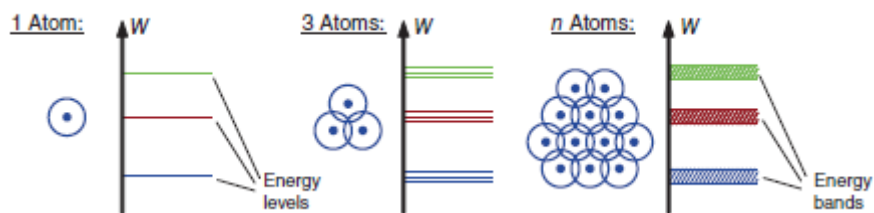
Сурет 18 – GaAs және CdTe мысалындағы күрделі жартылай өткізгіштердің торлары

Осы уақытқа дейін қарастырылған тор тек IV топтың элементі кремнийден тұрады. Дегенмен, әртүрлі негізгі топтардың элементтерін біріктіруге болады. Танымал өкілі - күн батареяларында жоғары тиімділікті қамтамасыз ете алатын галлий-арсенид (GaAs) материалды байланысы. Ол үш валентті галлий мен бес валентті мышьяк атомдарынан тұрады, сондықтан III/V жартылай өткізгіш деп аталады. 18-суретте құрылым көрсетілген: Кристалда бір мезгілде галлий мен мышьяк атомдары болады, олар әрқашан олардың валенттік электрондарын қосылысқа түседі, нәтижесінде қайтадан асыл газ конфигурациясы болады. III/V-жартылай өткізгіштерден басқа, II/VI-электрлік өткізгіштер де қызығушылық тудырады. № 18-суретте бұл кадмий-теллурид (CdTe) мысалында көрсетілген.

Жартылай өткізгіштерде заряд тасымалдау

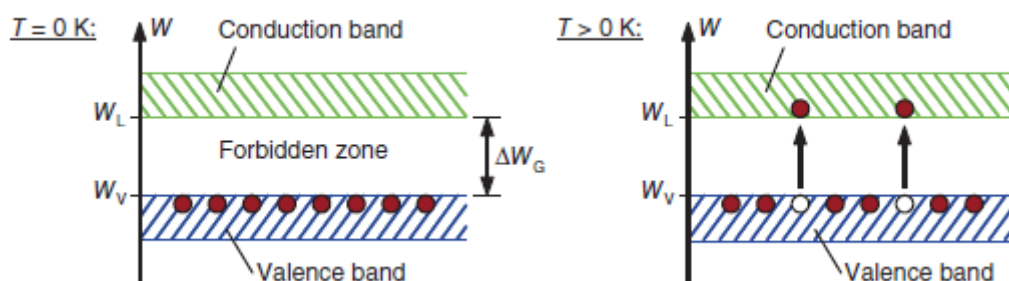
Энергия жолақтарының шығу тегі

Сонымен бірге біз жеке атомның электрондары үшін анықталған, дискретті энергия деңгейлері бар екенін білеміз. Ойша тәжірибе жасайық, екі атомды бір-біріне жақындатсақ не болады? Атомдардың өзара байланысы пайда болады. Нәтиже - энергия шарттары өзгереді және әрбір күй екі жеке күйге бөлінеді (20 суретті қараңыз). Бұл құбылыстың аналогиясын классикалық механикадан көруге болады. Егер біреуі екі гармоникалық осцилляторды (мысалы, екі гитара жолын) біріктірсе, нәтиже екі жаңа резонанстық жиілік болып табылады. Үш байланысқан атом жағдайында нәтиже әрқашан үш жаңа деңгей болып табылады және т.б. Егер жартылай өткізгіш кристалға қарайтын болсақ, онда атомдардың іс жүзінде шексіз санын біріктіруге болады. Жеке деңгейлер әлі де әрең танылады және бұл жағдайда энергетикалық жолақтар туралы айтылады. Энергия жолақтары электрон үшін рұқсат етілген барлық энергетикалық күйлерді көрсетеді.



Сурет 20 – Жартылай өткізгіш кристалдағы энергетикалық жолақтардың шығу тегі: атомдардың қосылуы энергия деңгейлерінің таралуына әкеледі. $n \rightarrow \infty$ үшін бұл үздіксіз энергия жолақтарына әкеледі

Қатты дененің электрлік қатынасы үшін әлі де электрондар алып жатқан ең жоғары жолақ шешуші болып табылады. Оны валенттік электрондар алып жатқандықтан, оны валенттік аймақ деп атайды (21-суретті қараңыз). Бірінші бос жолақ өткізгіштік жолағы деп аталады. Өткізгіштік зонасына кіру үшін электрон алдымен тыйым салынған аймақты жеңуі керек. Тыйым салынған аймақтың ені валенттік аймақтан өткізгіштік аймаққа өту үшін қажетті энергия мөлшерін анықтайды. Бұл ΔW_G жолағы деп те аталады. Бұл W_L өткізгіштік жолағының астыңғы жағы мен W_V валенттілік жолағының жоғарғы жағының айырмашылығының нәтижесі. Кремний жағдайында тыйым салынған аймақ $\Delta W_G = 1,12$ эВ. «G» индексі диапазон терминін білдіреді.



Сурет 21 – Кремнийдің валенттілік және өткізгіштік жолақтары: Температураның жоғарылауымен жеке электрондар өткізгіштік зонасына көтеріледі

Бұл кристалдардың электрлік әрекеті үшін нені білдіреді? Нөлдік абсолютті температура ($T=0K$) жағдайында валенттік электрондар байланыстарында тұрақты болып қалады. Бұл жағдайда кристал электр тогын өткізе алмайды, өйткені бос заряд тасымалдаушылар жоқ.

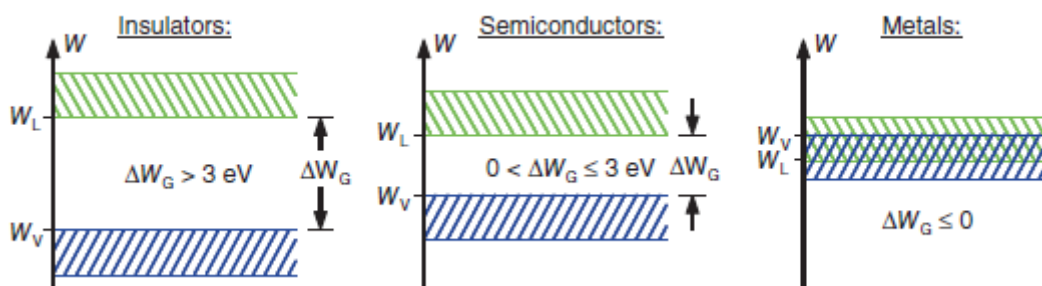
$T=0$ К (Кельвин) абсолютті нөлдік температурасы $v=-273,15$ °С температураға сәйкес келеді.

Температура көтерілсе, электрондар жылу тербелістерінен қозғала бастайды. Температура одан әрі жоғарыласа, жеке электрондар байланыстарынан босатылып, кристалда бос электрондар пайда болады. Жолақ үлгісінде бұл электрондар валенттік аймақтан көтеріліп, тыйым салынған аймақты жеңіп, өткізгіштік зонаға өтеді. Олар өткізгіш электрондарға айналады және кристалдың өткізгіштігін арттырады.

Диэлектриктегі, жартылай өткізгіштердегі және өткізгіштердегі айырмашылықтар

Жартылай өткізгішпен танысқаннан кейін біз басқа материалдармен танысамыз. Осы мақсатта 22-суретте диэлектриктердің, жартылай өткізгіштердің және металдардың энергетикалық жолақтарының салыстыруы

келтірілген. Диэлектриктер жағдайында тыйым салынған аймақ өте үлкен. Диэлектриктер әдетте жолақ аралығы шамамен 3 эВ-тан асатын материалдар болып табылады. Бұл тіпті жоғары температурада бос электрондардың дерлік жоқтығын білдіреді. Төмен температурадағы жартылай өткізгіштер де диэлектриктер қызметін атқарады. Алайда орташа температурада өткізгіштік өте жоғары температураларда (мысалы, 200 °С-тан жоғары) олар жақсы өткізгіштерге (осылайша жартылай өткізгіштер термині) айналғанша артады.



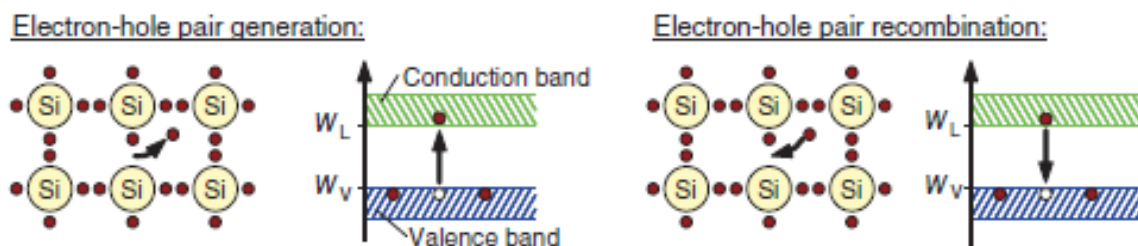
Сурет 22 – Диэлектриктердің, жартылай өткізгіштердің және металдардың энергетикалық жолақтарын бейнелеу

Металдар ерекше жағдай. Бұлардың көмегімен біз олардың валенттілігі мен өткізгіштік жолақтары тіпті төмен температурада да жоғары өткізгіштік дәрежесіне ие болатындай қабаттасатынын жеңілдетілген түрде айта аламыз.

Өзіндік/меншікті тасымалдаушы концентрациясы

Біз енді жартылай өткізгіш кристалдағы процестерді тереңірек зерттейміз. 23-суретте кристалл, сондай-ақ жолақ үлгісінде бос электронның генерациясы көрсетілген. Электрон байланыстарынан шыққан бойда кристалда **кемтік** деп аталатын саңылау пайда болады. Бүкіл процесс **электрон-кемтік жұптарының генерациясы** деп аталады. Кері процесті 23-суреттің оң жағындағы суреттен көруге болады: бос электрон қайтадан бос орынға түседі және бұл **электрон-кемтік жұптарының рекомбинациясы** деп аталады.

Кристалда электронды-кемтік жұптарының генерациясы және рекомбинациясы үздіксіз жүреді. Жартылай өткізгіш материалға және ағымдағы температураға байланысты бос электрондардың орташа саны, сондай-ақ кемтіктердің өзіндік тасымалдаушы концентрациясы n_i деп аталады.



Сурет 23 – Бос электрон-кемтік электрон жұптарының термиялық генерациясы және рекомбинациясы: Орташа уақыт ішінде бос электрондардың, сондай-ақ саңылаулардың орташа саны, меншікті тасымалдаушы концентрациясы бар

i индексі *өзіндік/меншікті* дегенді білдіреді. Бұл қоспаланбаған жартылай өткізгіш екенін көрсетеді.

Меншікті тасымалдаушы концентрациясын келесі теңдеу арқылы анықтауға болады:

$$n_i = N_0 \cdot e^{-\frac{\Delta W_G}{2 \cdot k \cdot T}}$$

N_0 - кремний үшін күйлердің тиімді тығыздығы $N_0 \approx 3 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$

k - Больцман тұрақтысы $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K} = 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

Белгілі бір дәрежеде N_0 күйлердің тиімді тығыздығы төтенше жағдайда (төтенше жоғары температурада) түзілуі мүмкін бос электрондардың санын береді. Бұл жерде қарапайымдылық үшін біз электрондардың күйлерінің тиімді тығыздығы бір кемтікпен бірдей деп есептедік. Әрбір түзілген бос электрон кристалдық торда тесік қалдырады. Сондықтан n_i бос электрондардың санын, сондай-ақ саңылаулардың санын сипаттайды.

Меншікті тасымалдаушы концентрациясына мысал:

Бөлме температурасындағы кремнийдің меншікті тасымалдаушы концентрациясын есептейміз (25°C). Алдымен Кельвиндегі абсолютті температура T есептейміз:

$$T = 273.15 \text{ K} + 25 \text{ K} = 298.15 \text{ K}$$

Енді біз барлық мәндерді жоғарыдағы формулаға енгіземіз

$$n_i = N_0 \cdot e^{-\frac{1.12 \text{ eV}}{2 \cdot 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \cdot 298.15 \text{ K}}} = 1.06 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3 \approx 10^{10} / \text{cm}^3$$

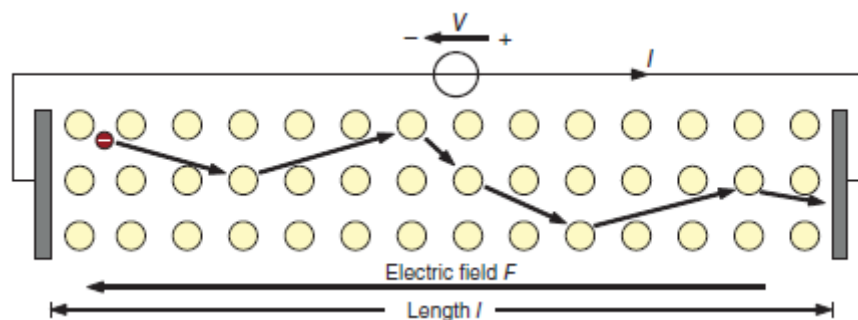
Жартылай өткізгіштерде заряд тасымалдау

Өріс токтары

24-суретте V электр кернеуі берілген кремний кристалы көрсетілген. Пластиналық конденсатордағы сияқты бұл кернеу кристалдағы F электр өрісіне әкеледі:

$$F = \frac{V}{l}$$

Бұл өрістің көмегімен теріс зарядталған электрондар кернеу көзінің оң полюсінің бағытына қарай үдетіледі. Осылайша, жартылай өткізгіш арқылы ток ағыны болады, ол өріс тогы деп аталады (кейде дрейфтік ток). Бірақ кристалдағы электрондар атом ядросына қайта-қайта соқтығысады, өріс көмегімен тежеледі және қайтадан үдетіледі. Орташа уақыт бойынша олар белгілі бір орташа дрейф жылдамдығына жетеді v_D .



Сурет 24 – Кремний кристалы арқылы токтың тасымалдануы: электрондар атом ядросымен соқтығысқан кезде бірнеше рет тежеледі, содан кейін қайтадан жеделдетіледі.

Қолданылған F өрісі үшін осы дрейф жылдамдықтарының v_D коэффициенті электрондардың μ_N қозғалғыштығы деп аталады:

$$\mu_N = \frac{v_D}{F} \quad (1)$$

Температураның жоғарылауы кристалға қалай әсер ететінін түсіну оңай: температура неғұрлым жоғары болса, кристалдық тордың тербелісі соғұрлым күшті болады. Бұл үдетілген электрондардың атом ядроларымен соқтығысу ықтималдығын арттырады.

Орташа дрейф жылдамдығы және осылайша электрондардың қозғалғыштығы төмендейді. 24-суреттегі кристалдың көлемдеріндегі электрондар саны N :

$$N = n \cdot \text{volume} = n \cdot A \cdot l \quad (2)$$

n - электрон концентрациясы, A -кристалдың көлденең қимасының ауданы, l -кристалдың ұзындығы

$$I_F = \frac{\text{Charge}}{\text{Time}} = \frac{q \cdot N}{\Delta t} = q \cdot n \cdot A \cdot \frac{l}{\Delta t} = q \cdot n \cdot A \cdot v_D = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_N \cdot F$$

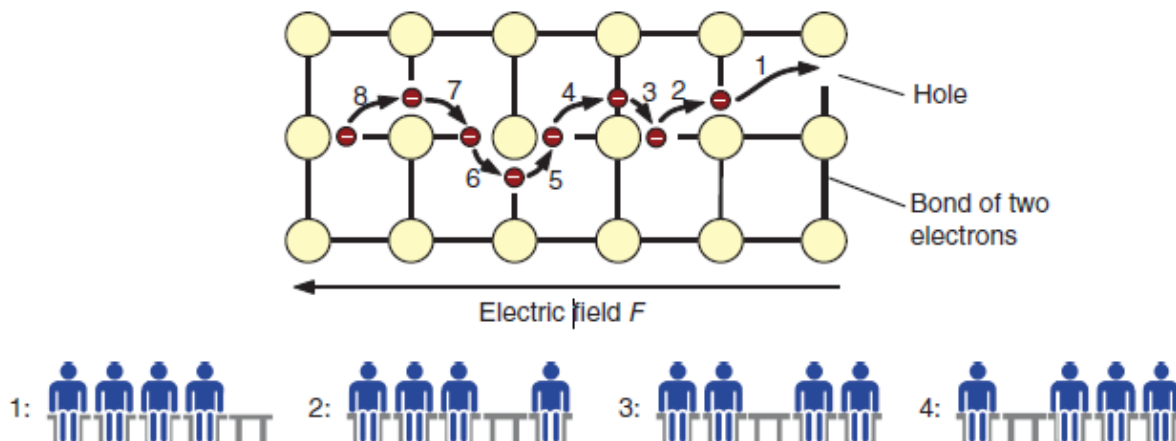
Бұл электрондар $\Delta t = v_D \cdot l$ уақыт ішінде кристал арқылы электр өрісімен итеріледі l , өріс тогы үшін 3.5 теңдеуімен I_F бұл нәтижеге әкеледі:

n - ток тасымалдаушы концентрациясы

$$j_F = \frac{I_F}{A} = q \cdot n \cdot \mu_N \cdot F$$

Электрондар арқылы ток тасымалдаудан басқа, жартылай өткізгіштегі кемтіктер арқылы ток тасымалдау да бар. Жақсырақ түсіну үшін 25-суретті қарастырыңыз: қолданылғандықтан электрондар арқылы ток тасымалдаудан басқа, жартылай өткізгіштегі кемтіктер арқылы ток тасымалдау да бар. Жақсырақ түсіну үшін 25-суретті қарастырыңыз: қолданылатын электр өрісінің арқасында электрон көрші бос кеңістікке секіреді. Осылайша, кемтік негізінен қарама-қарсы бағытта қозғалады. Ұқсас салыстыру, мысалы, футбол стадионы. Егер қатардың соңында бос орын болса және бір көрермен бірінен соң бірі келесі бос орындыққа ауысса, онда бос орындық қарама-қарсы бағытта «жылжиды». Тесіктердің қозғалғыштығы электронға

қарағанда төмен екені анық. Тесіктің қозғалғыштығы үшін электрондар бірінен соң бірі бос кеңістіктерге қозғалуы керек, бұл кристалдағы бос электронның қозғалысына қарағанда әлдеқайда баяу жүреді. Кремнийде шамамен $450\text{см}^2/\text{Вс}$ болатын саңылаулардың μ_p қозғалғыштығы $1400\text{см}^2/\text{Вс}$ электронның μ_n қозғалғыштығының үштен бір бөлігін ғана құрайды.



Сурет 25 - Кемтіктер арқылы токты тасымалдау. Электрондар бірінен соң бірі оңға қарай жылжиды. Сондықтан қарама-қарсы бағытта «тесік қозғалысы» бар. Жағдайды орындықтардың қатарындағы адамдардың қозғалысымен салыстыруға болады

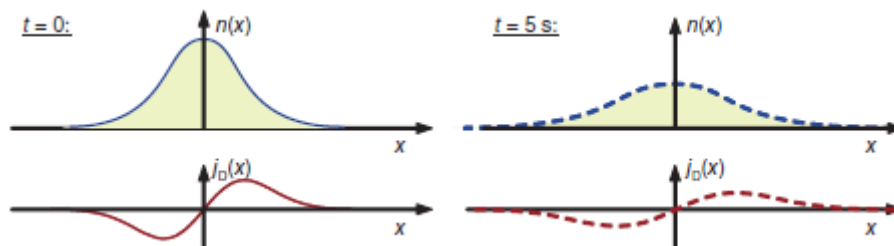
Диффузиялық токтар

Жартылай өткізгіштерде өріс тогынан басқа токтың екінші түрі бар: диффузиялық ток. Бұл қажетті энергияны жылу торының қозғалысымен қамтамасыз ететін концентрациядағы айырмашылықтардан туындайды. Кристалдағы бір жерде заряд концентрациясының жоғарылауы болған, заряд тасымалдаушының жоғары концентрациясы қайтадан теңестірілгенше диффузиялық ток ағады. Диффузиялық токтың биіктігі $n(x)$ бөлшектер концентрациясының градиентіне пропорционал (осылайша теңестіру):

$$j_D = -q \cdot D \cdot \frac{dn(x)}{dx}$$

j_D - диффузиялық токтың тығыздығы, q -элементар заряд, D - диффузия тұрақтысы

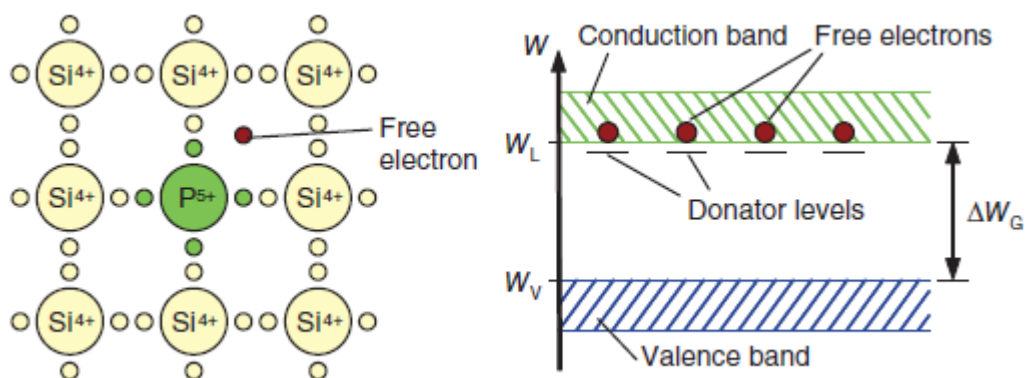
Жақсырақ түсіну үшін құм үйіндісінің ұқсастығын қарастырамыз (26-сурет). Бұл вибрациямен шайқалған тақтада жатыр. Діріл әсерінен құм бөлініп кетеді. Құмның ең үлкен ағындары тік беттерде болады, ал ортадағы құм бөлшектері іс жүзінде тікелей түбіне батады.



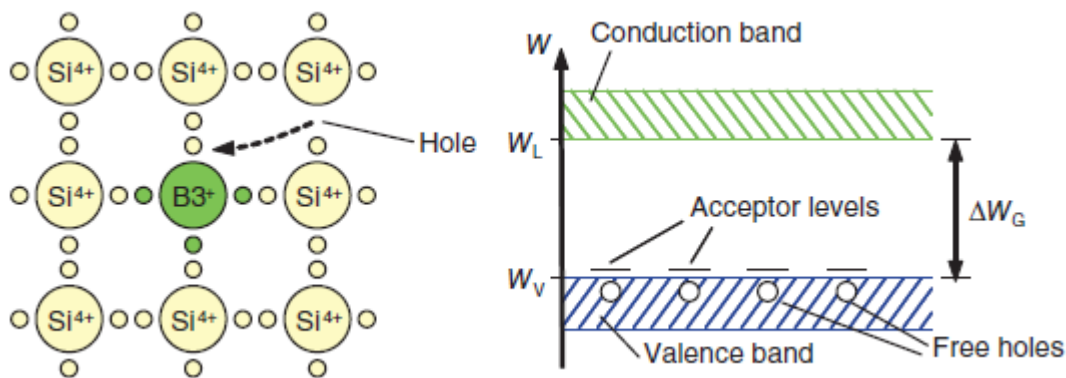
Сурет 26 – Құм үйіндісіндегі диффузиялық тоқты түсіндіру. Егер вибрация $t=0$ уақытында қосылса, онда құм үйіндісі бөлініп ағады. Ең жоғары «құм бөлшектерінің ағындары» үйіндінің ең тік жерлерінде болады

Осылайша, құм үйіндісінің биіктігі $n(x)$ еңісі «құм үйіндісінің ағынының» мөлшерін береді. 5 секундтан кейін құм үйіндісі кеңейіп, тегіс болды, демек, бөлшектер ағыны азаяды. Процесс «құм концентрациясының айырмашылығы» толығымен азайғанша жалғасады, сондықтан құм толығымен біркелкі бөлінеді.

p және n-типті легирлеу/қоспалау

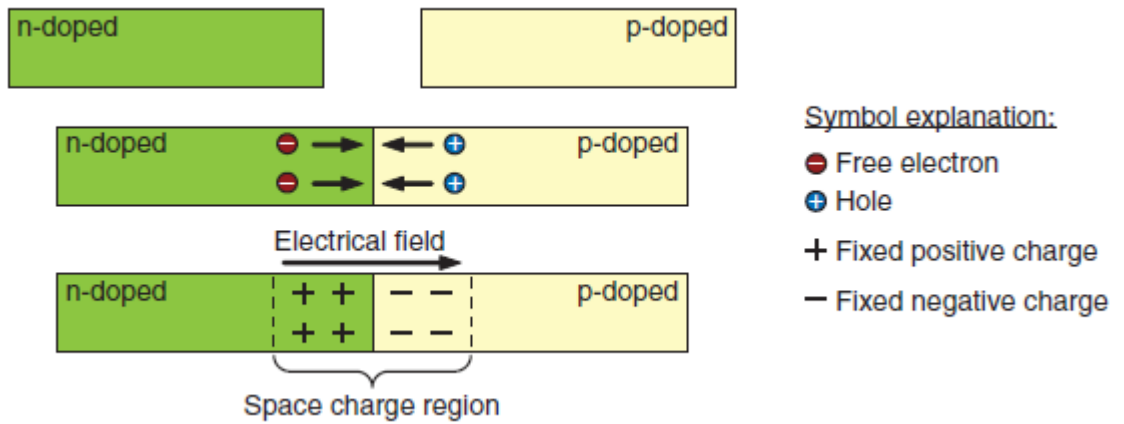


Сурет 27 - n-жартылай өткізгіштерді қоспалау; фосфор атомының бес валенттік электрондарының бірі байланыс үшін қажет емес, сондықтан бос электрон ретінде қол жетімді. Допингке байланысты жолақ диаграммасында өткізгіштік диапазон жиегінен сәл төменірек жаңа энергия деңгейі бар

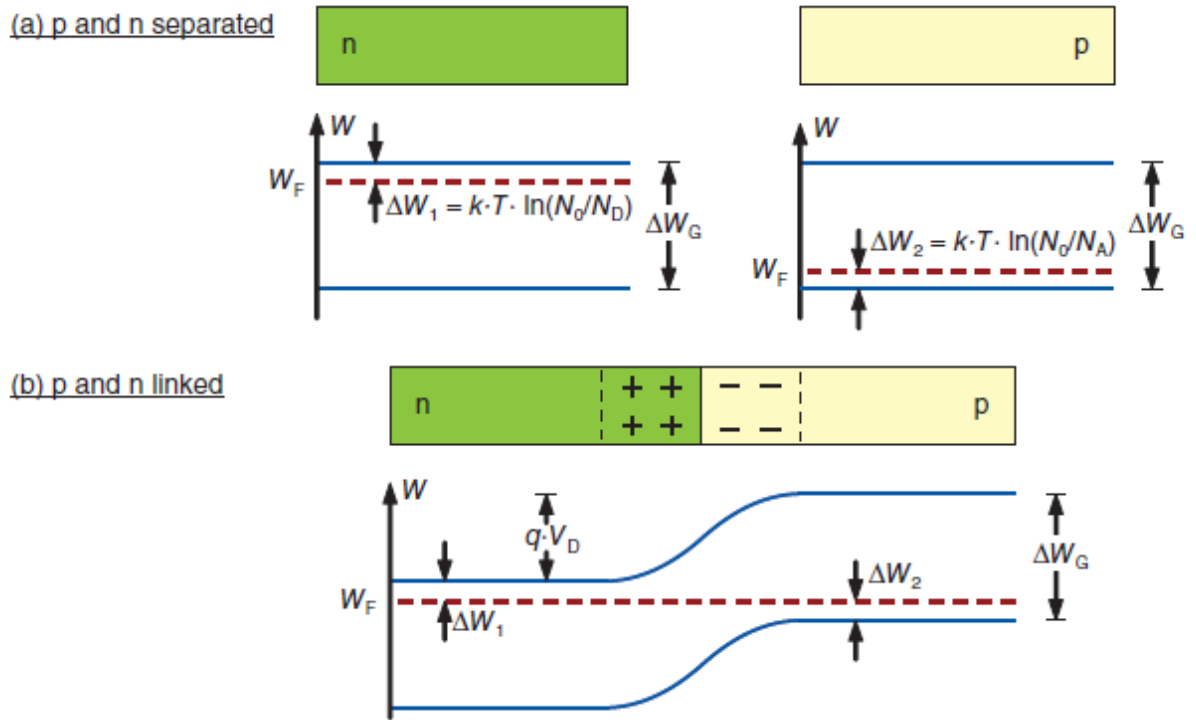


Сурет 28 - Бор атомы бар кремний кристалының p-қоспасының мысалы: төрт байланыстың біреуі ашық қалады, өйткені бор атомы тек үш валенттілік электронын ұсына алады. Көрші электрон осы байланысқа ауысады және осылайша тесікті «генерациялайды».

p-n өткелі



Сурет 29 - p-n өтуі: электрондар n-жағынан p-жағына қарай ағып, сол жерде тесіктерді алады. n жағында бекітілген оң зарядтар артта қалады; p жағында тіркелген теріс зарядтар пайда болады



Сурет 30 - p-n өткелінің V_D диффузиялық кернеуін n- және p-қоспаланған жақтардың Ферми энергиялары арқылы анықтау.

$$q \cdot V_D = \Delta W_G - \Delta W_1 - \Delta W_2$$

$$\Delta W_1 = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N_D}\right)$$

$$\Delta W_2 = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N_A}\right)$$

Сурет 31 - Қолданылған кернеумен p-n өткелінің әрекеті: V көтерілген кезде ғарыштық заряд аймағы толығымен жойылып, ток өтуі мүмкін болғанша

азаяды. Кері кернеу жағдайында диод блоктары және кеңістіктік заряд аймағы үлкейеді

Диод сипаттамалары

$$j_F = j_D \Rightarrow q \cdot n(x) \cdot \mu \cdot F(x) = -q \cdot D \cdot \frac{dn(x)}{dx}$$

- диод немесе Шокли теңдеуі деп аталады.

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

I_S - диодтың қанығу тогы

V_T - термиялық кернеу

қанығу тогы I_S анықталады:

$$I_S = A \cdot \left(\frac{q \cdot D_N \cdot n_i^2}{L_N \cdot N_A} + \frac{q \cdot D_P \cdot n_i^2}{L_P \cdot N_D} \right)$$

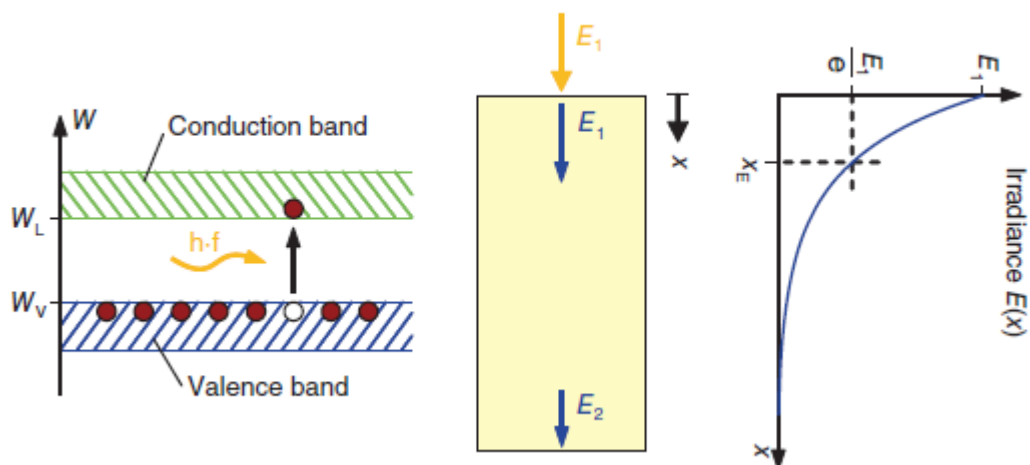
электрондардың немесе кемтіктердің диффузиялық ұзындығы

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

Жарық пен жартылай өткізгіштердің әрекеттесуі

32-суретте жартылай өткізгіш кристалдағы жарықтың жұтылуының әсері көрсетілген. Түскен жарық фотондары жеке электрондарды валенттіліктен өткізгіштік зонаға көтереді. Бұл әсерді іске қосу үшін фотондардың W_{ph} энергиясы жолақ аралығынан үлкен болуы керек:

$$W_{ph} = h \cdot f = \Delta W_G$$



Сурет 32 - Жартылай өткізгіштегі жарықты жұту принципі. (Сол жақ); фотон жеткілікті жарық энергиясымен ғана жұтылады және электрон өткізгіштік зонасына көтеріледі. (Оң жақ); Жартылай өткізгішті кристалға кездейсоқ жарық сәулеленуі: материалдағы жұтылу салдарынан жарық қарқындылығы ену тереңдігінің артуымен төмендейді.

Қатты денедегі жарықтың жұтылуы қандай әсер етеді? Жартылай өткізгіш кристалдағы жарық сәулесінің түсуі 32-суретте көрсетілген. Кристалдан өткенде сәулелену E жұтылу салдарынан үздіксіз батып отырады. Жұтатын материалдағы сәулелену барысын ыдырау экспоненциалды функция арқылы сипаттауға болады:

$$E(x) = E_1 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

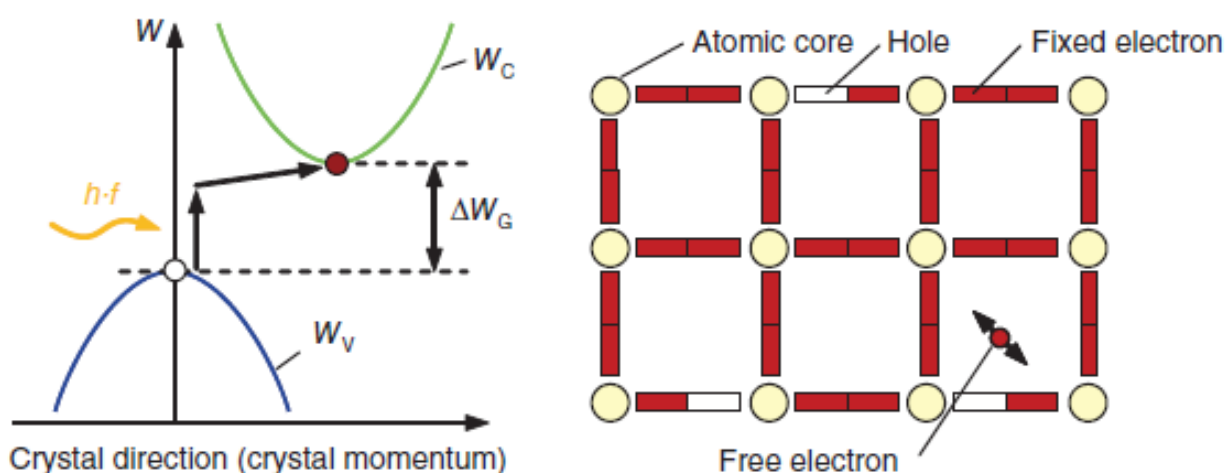
E_1 - $x=0$ кезіндегі сәулелену

α - жұтылу коэффициенті

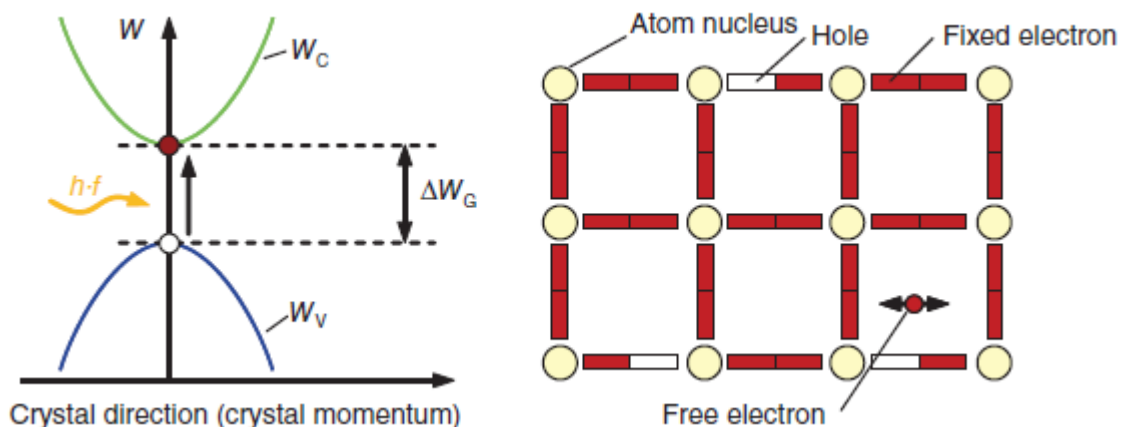
Жұту коэффициенті α сәйкес материалдың сіңіру «қабілетін» көрсетеді. Кейде x_p ену тереңдігі қолданылады. Бұл қай жарық жолына сәйкес қарқындылықтың $1/e$ есе азайғанын сипаттайды (осылайша шамамен 37%). Екі шама арасындағы байланыс келесі теңдеумен берілген:

$$x_p = \frac{1}{\alpha}$$

Тура және жанама жартылай өткізгіштер



Сурет 33 - Жанама жартылай өткізгішті түсінудің қарапайым моделі: фотонды жұту үшін электрон өзінің тербеліс бағытымен қатар энергиясын өзгертуі керек.



Сурет 34 - Тікелей жартылай өткізгіштегі жағдай: Бос электронды жұтылу арқылы тудыруға болады, өйткені ол тербеліс бағытын өзгертпейді, тек энергияны өзгертеді.

Беттердегі шағылысу

Біз n_1 және n_2 сыну көрсеткіштері әртүрлі екі материалды қарастырамыз (сол жақта 35-суретті қараңыз). Материалдың сыну көрсеткіші n жарық жылдамдығы оның вакуумдегі жылдамдығымен салыстырғанда қандай фактормен төмендейтінін көрсетеді: $n=c_0/c$. Егер жарық сәулесі екі материал арасындағы интерфейске түссе, нәтиже шағылысу болып табылады. Шағылу күші R шағылу коэффициентімен беріледі

$$R = \frac{E_R}{E_0}$$

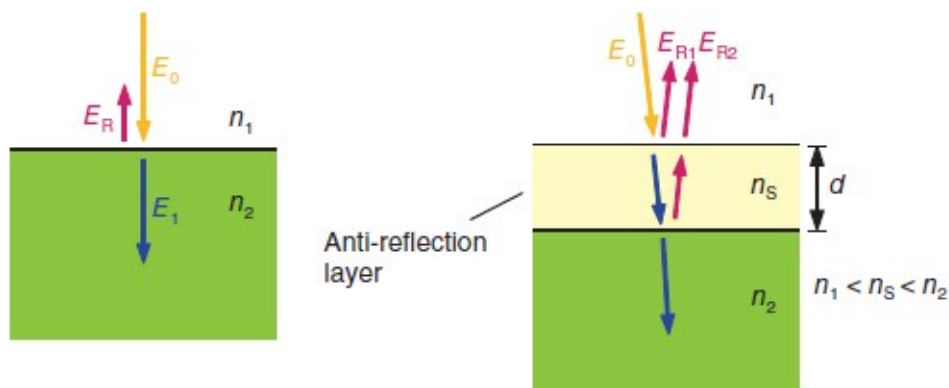
E_0 - түскен сәулелену

E_R - шағылысқан сәулелену

Тік кездейсоқ сәулелену үшін шағылысу коэффициенті келесі теңдеу бойынша есептеледі:

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

Бетінде шағылуға қарсы төсеніші бар материал мысалы:



Сурет 35 - Екі орта арасындағы интерфейстегі жарықтың шағылысуы: шағылуды шағылыстыруға қарсы қабатты қолдану арқылы азайтуға болады (оң жақта)

Әдебиет тізімі:

1. Mertens, K. (2018). *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. John Wiley & Sons.

