

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Электроника негіздері

«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар», «Өндірістік электроника және басқару жүйелері» мамандықтары бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы

4 Дәріс

Тақырыбы: Қатты денелердің аймақтық теориясы. Заряд тасымалдаушыларының концентрациясы

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Қатты денелердің аймақтық (зоналық) теориясының физикалық негіздерін түсіндіру және заряд тасымалдаушыларының концентрациясын сипаттайтын негізгі ұғымдармен таныстыру. Лекция барысында кристалдық құрылымдағы электрондардың кванттық-механикалық қозғалысы, энергетикалық аймақтардың (валенттік, тыйым салынған және өткізгіштік аймақтар) пайда болу механизмі және шалаөткізгіштер мен өткізгіштердің электрлік қасиеттерін анықтайтын факторлар қарастырылады. Сонымен қатар, заряд тасымалдаушыларының концентрациясын есептеу әдістері, Ферми деңгейінің рөлі және температураға тәуелділігі зерттеледі.

Міндеттері:

1. Қатты денелердің аймақтық (зоналық) теориясының физикалық негіздерін түсіндіру;
2. Кристалдық құрылымдағы электрондардың кванттық-механикалық қозғалысын сипаттау және Шрёдингер теңдеуінің маңызын түсіндіру;
3. Энергетикалық аймақтардың (валенттік, өткізгіштік және тыйым салынған аймақтардың) пайда болу механизмін түсіндіру;
4. Материалдардың түріне қарай тыйым салынған аймақтың (E_g) мәні мен оның өткізгіштік қасиеттерге әсерін талдау;
5. Заряд тасымалдаушыларының (электрондар мен кемтіктердің) табиғатын және олардың концентрациясын анықтау тәсілдерін үйрету;
6. Ферми деңгейінің физикалық мәнін және температураның заряд тасымалдаушыларына әсерін түсіндіру;
7. Шалаөткізгіштер мен диэлектриктердің өткізгіштік қасиеттерін аймақтық теория негізінде салыстыру дағдысын қалыптастыру.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- Қатты денелердің аймақтық теориясы — кристалдық материалдардағы электрондардың энергетикалық деңгейлерін және олардың қозғалысын сипаттайтын кванттық-механикалық теория.
- Кристалдық тор — атомдар кеңістікте периодты түрде орналасқан құрылым.
- Периодты потенциал өрісі — кристалдағы атомдардың периодты орналасуынан туындайтын өріс, ол электрон қозғалысын анықтайды.
- Шрёдингер теңдеуі — кванттық жүйедегі электронның толқындық күйін және энергиясын анықтайтын негізгі теңдеу.
- Блох теоремасы — периодты потенциал өрісінде электронның толқындық функциясын сипаттайтын заңдылық, $\psi(r)=u(r)e^{ik \cdot r}$.

- Энергетикалық аймақ (зона) — қатты денеде электрондар орналасатын рұқсат етілген энергиялар жиыны.
- Валенттік аймақ (E_v) — атомдар арасындағы байланыстарды қамтамасыз ететін және толық толтырылған энергия аймағы.
- Өткізгіштік аймақ (E_c) — электрондардың еркін қозғалуына мүмкіндік беретін, электр тогын тасымалдайтын энергия деңгейлер аймағы.
- Тыйым салынған аймақ (E_g) — энергия деңгейлері болмайтын аймақ; оның ені материалдың өткізгіштік қасиеттерін анықтайды.
- Өткізгіштер — валенттік және өткізгіштік аймақтары қабаттасқан материалдар (мысалы, мыс, күміс).
- Шалаөткізгіштер — тыйым салынған аймағы тар материалдар, температура мен қоспалар әсерінен өткізгіштікке ие (мысалы, кремний, германий).
- Диэлектриктер — электрондарды қоздыру үшін үлкен энергия қажет ететін материалдар (мысалы, алмаз, шыны).
- Ферми деңгейі (E_F) — 0 К температурасында электронның болу ықтималдығы 50% болатын энергия деңгейі.
- Заряд тасымалдаушылары — электр тогын тасымалдайтын бөлшектер: электрондар (теріс заряд) және кемтіктер (оң заряд).
- Концентрация (n , p) — бірлік көлемдегі еркін электрондар мен кемтіктердің саны.
- Тыйым салынған аймақ ені (E_g) — өткізгіштік пен валенттік аймақтар арасындағы энергетикалық айырма, $E_g = E_c - E_v$.

Дәріс жоспары

Кіріспе

1. Энергетикалық аймақтар (зоналар) теориясының негіздері
2. Заряд тасымалдаушыларының концентрациясы

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

Қорытынды

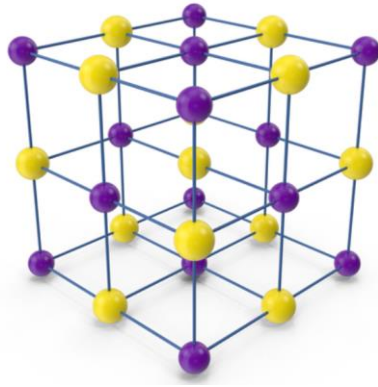
Әдебиеттер тізімі

Кіріспе

Қатты денелер физикасында материалдың электрлік, оптикалық және жылу қасиеттерін түсіндіру үшін аймақтық (зоналық) теория қолданылады. Бұл теория кристалдық тордағы электрондардың кванттық-механикалық қозғалысын сипаттайды және өткізгіш, шалаөткізгіш және диэлектриктер арасындағы айырмашылықтарды түсіндіруге мүмкіндік береді.

Қатты денелердің көпшілігі кристалдық құрылымға ие, яғни олардың атомдары кеңістікте қатаң тәртіппен, периодты түрде орналасқан. Әрбір атом өз электрондарын иеленіп, көрші атомдармен өзара әрекеттесе отырып, кристалдық тордың бөлігіне айналады. Атомдар арасындағы осындай өзара әсер — электрондардың энергетикалық деңгейлеріне тікелей әсер етеді.

Жеке атомда электрондар нақты дискретті энергетикалық деңгейлерде (қабықшаларда) орналасады. Бірақ миллиардтаған атомдардан құралған қатты денеде бұл деңгейлер бір-бірімен қабаттасып, кең энергетикалық жолақтар немесе энергетикалық аймақтар (зоналар) түзеді.



1. Энергетикалық аймақтар (зоналар) теориясының негіздері

Энергетикалық аймақтар теориясы (зоналық теория) — қатты денедегі электрондардың мінез-құлқын кванттық-механикалық тұрғыда сипаттайтын іргелі теория. Бұл теория кристалдық торда электрондардың қандай энергетикалық деңгейлерде бола алатынын және олардың электр тогын тасымалдауға қалай қатысатынын түсіндіруге мүмкіндік береді.

2.1. Потенциалдық өріс және электрондардың қозғалысы

Кристалдық қатты денеде атомдар кеңістікте периодты түрде орналасады. Осы атомдармен байланысқан электрондар да сол периодты құрылыммен өзара әрекеттесіп, периодты потенциал өрісінде қозғалады.

Бұл жағдайда электронның кванттық қозғалысы бірөлшемді Шрёдингер теңдеуімен сипатталады:

$$\hat{H}\psi(r) = E\psi(r)$$

мұндағы:

$\hat{H}$ — Гамильтониан операторы: жүйенің толық энергиясын сипаттайды,
 $\psi(r)$ — электронның толқындық функциясы (мүмкін болатын координаталардағы болу ықтималдығын сипаттайды),

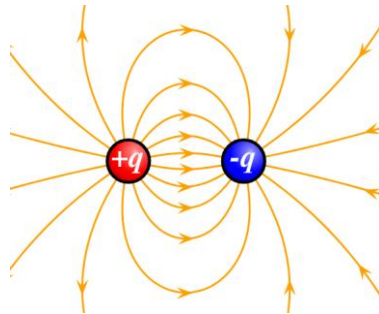
E — электронның энергиясы,

$\mathbf{r}$ — электронның кеңістіктегі орны.

Периодты потенциал өрісі $V(\mathbf{r})$ шартын қанағаттандырады:

$$V(\mathbf{r}+\mathbf{R})=V(\mathbf{r})$$

мұндағы: $\mathbf{R}$ — кристалдық тордың кез келген векторы.



2.2. Блох теоремасы

Кристалдық қатты денедегі электронның қозғалысын сипаттау үшін Блох теоремасы қолданылады. Бұл теоремаға сәйкес, периодты потенциал өрісінде электронның толқындық функциясы келесідей түрде жазылады:

$$\psi_{n,k}(\mathbf{r})=u_{n,k}(\mathbf{r})e^{ik\cdot\mathbf{r}}$$

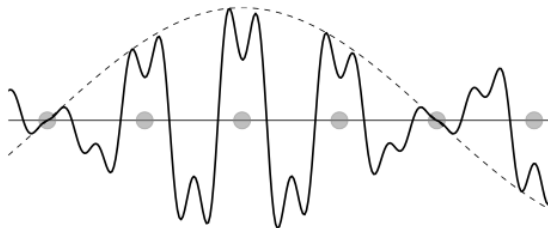
мұндағы:

$u_{n,k}(\mathbf{r})$ — тордың периодына сәйкес келетін функция, яғни $u(\mathbf{r}+\mathbf{R})=u(\mathbf{r})$,

$\mathbf{k}$ — толқындық вектор, электронның кристалдағы квазиимпульсуына сәйкес келеді,

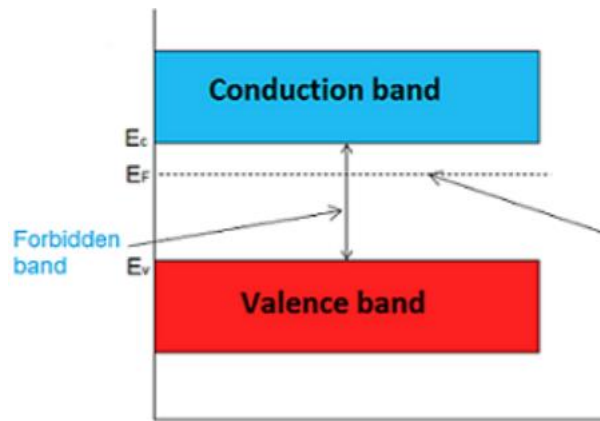
n — энергетикалық аймақтың нөмірі (мысалы, валенттік аймақ, өткізгіштік аймақ).

Бұл форма Блох функциясы деп аталады және ол электрондардың периодты ортада бос электрондар сияқты емес, бірақ толқындық қасиеттерін сақтай отырып қозғала алатынын көрсетеді.



2.3. Тыйым салынған аймақ және өткізгіштік аймағы

Шрёдингер теңдеуінің шешімдері нәтижесінде электрондар белгілі бір энергетикалық аймақтарда ғана бола алады. Электронның кез келген энергия мәні мүмкін емес. Бұл энергетикалық құрылым келесідей сипатталады:



Валенттік аймақ (Valence Band)

- ❖ Толтырылған энергетикалық деңгейлер жиыны.
- ❖ Бұл аймақтағы электрондар атом ядросына жақын, көбіне химиялық байланыстарға қатысады.
- ❖ Электр тогын тасымалдауға қабілетті емес, себебі барлық деңгейлер толық толтырылған.

Өткізгіштік аймақ (Conduction Band)

- ❖ Электрондардың еркін қозғалуына мүмкіндік беретін бос немесе жартылай толтырылған энергетикалық деңгейлер.
- ❖ Осы аймаққа өткен электрондар электр тогын тасымалдай алады.
- ❖ Бұл аймақ валенттік аймақтың үстінде орналасады.

Тыйым салынған аймақ (Forbidden Band, Band Gap)

- ❖ Энергетикалық деңгейлер болмайтын аймақ.
- ❖ Электрон бұл аймақта бола алмайды.
- ❖ Оның ені E_g деп белгіленеді және материалдың қасиетіне тікелей әсер етеді:

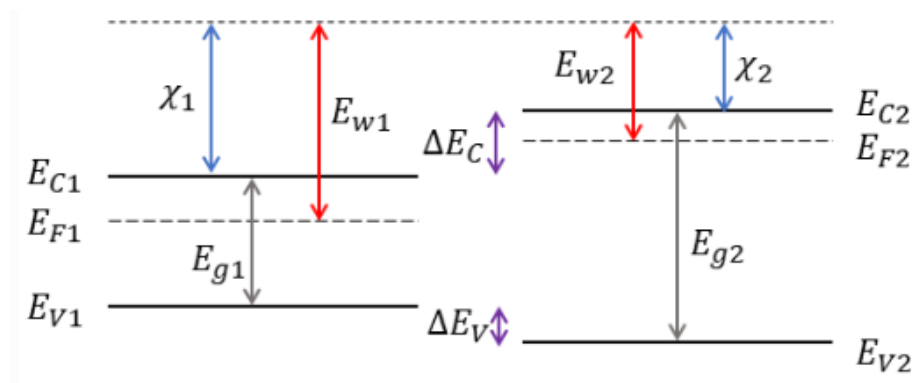
$$E_g = E_c - E_v$$

мұндағы:

E_g — тыйым салынған аймақтың ені (band gap),

E_c — өткізгіштік аймақтың төменгі шекарасы,

E_v — валенттік аймақтың жоғарғы шекарасы.



2.4. Материал түрлеріне байланысты E_g мәні

Материал түрі	E_g мәні (эВ)	Сипаттамасы
---------------	-----------------	-------------

Өткізгіштер	$E_g \approx 0$	Валенттік және өткізгіштік аймақтар қабаттасады (мыс: мыс, күміс)
Шалаөткізгіштер	$0 < E_g < 3$	Аз ғана энергиямен электрондарды қоздыруға болады (мыс: кремний — 1.1 эВ, германий — 0.66 эВ)
Диэлектриктер	$E_g > 3$	Электронды қоздыру үшін өте көп энергия қажет (мыс: алмаз — 5.5 эВ)

2. Заряд тасымалдаушыларының концентрациясы

Кристалдық қатты денелерде, әсіресе шалаөткізгіштерде, тоқты электр өрісі арқылы тасымалдайтын негізгі элементтер — электрондар және кемтіктер (дырыстар). Бұл бөлшектерді жалпы заряд тасымалдаушылары деп атаймыз. Олардың концентрациясы — яғни, көлем бірлігіндегі саны — материалдың өткізгіштік қасиеттерін анықтайды.

Заряд тасымалдаушылар концентрациясы температураға, қоспалар мөлшеріне және тыйым салынған аймақтың еніне тәуелді. Төменде біз осы байланыстарды сипаттайтын негізгі теориялық негіздерді қарастырамыз.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

1. Қатты денелердің аймақтық теориясының негізгі идеясы неде және ол не үшін қажет?
2. Кристалдық тор дегеніміз не және оның электрондардың қозғалысына әсері қандай?
3. Шрёдингер теңдеуінің қатты денелер физикасындағы рөлі қандай?
4. Блох теоремасы нені сипаттайды және оның физикалық мәні неде?
5. Валенттік аймақ, өткізгіштік аймақ және тыйым салынған аймақ ұғымдарын түсіндіріңіз.
6. Тыйым салынған аймақ ені (E_g) материалдың электрлік қасиеттеріне қалай әсер етеді?
7. Өткізгіш, шалаөткізгіш және диэлектрик материалдардың айырмашылығын түсіндіріңіз.
8. Ферми деңгейінің мәні мен маңызын сипаттаңыз.
9. Заряд тасымалдаушыларының қандай түрлері бар және олар электр тогын қалай тасымалдайды?
10. Заряд тасымалдаушыларының концентрациясы қандай факторларға тәуелді?
11. Температура артқан кезде шалаөткізгіштің өткізгіштік қасиеті қалай өзгереді?

12. Кемтіктердің пайда болу механизмі қандай және олардың физикалық мәні неде?
13. Тыйым салынған аймақ пен өткізгіштік аймақ арасындағы байланыс электрондық құрылғылардың жұмысына қалай әсер етеді?
14. Неліктен шалаөткізгіш материалдар заманауи электроникада негізгі рөл атқарады?
15. Ферми деңгейі температураға тәуелді ме? Егер иә болса, қалай өзгереді?

Қорытынды:

Қатты денелердің аймақтық (зоналық) теориясы — заманауи материалтанудың және электрониканың негізін құрайтын іргелі ұғым. Бұл теорияның көмегімен біз кристалдық тордағы электрондардың қозғалысын, олардың энергия деңгейлерін және осы деңгейлердің периодты құрылымдағы өзгерісін түсіндіре аламыз. Шрёдингер теңдеуі мен Блох теоремасы кристалдағы электрон күйінің кеңістіктік және энергетикалық сипаттамасын анықтауға мүмкіндік береді.

Энергетикалық аймақтар мен тыйым салынған зоналар ұғымдары арқылы материалдардың өткізгіштік қасиеттері — өткізгіш, шалаөткізгіш және диэлектрик болып бөлінуінің физикалық негізі ашылады. Валенттік және өткізгіштік аймақтар, сондай-ақ олардың арасындағы тыйым салынған аймақ *E_g*, электрондардың жылулық және сыртқы өрістер әсерінен қалай қозғалатынын анықтайды.

Заряд тасымалдаушыларының концентрациясын анықтау арқылы біз нақты температурада немесе қоспалар болған жағдайда шалаөткізгіштің өткізгіштігін есептей аламыз. Бұл — шалаөткізгіш құрылғылардың (диодтар, транзисторлар, күн панельдері, сенсорлар) жұмысын жобалау мен талдаудың маңызды элементі.

Жалпы алғанда, аймақтық теория — электрондық құрылымдар мен құрылғылардың жұмыс істеу механизмін тереңірек түсінуге жол ашады. Бұл білім заманауи нанотехнология, кванттық электроника және энергия үнемдеу салаларында кеңінен қолданылады.

Әдебиеттер тізімі:

1. Кителл Ч. Введение в физику твёрдого тела. — М.: Наука, 1981.
2. Ashcroft N.W., Mermin N.D. Solid State Physics. — Saunders College Publishing, 1976.
3. Ю.А. Васильев. Физика полупроводников и диэлектриков. — М.: Высшая школа, 2002.
4. С.М. Резник. Физика твердого тела. — М.: Лань, 2015.
5. С. Хамидуллин. Жартылай өткізгіштер физикасы. — Алматы: Қазақ университеті, 2008.
6. Сейітов Ш.Ж. Қатты денелер физикасы: оқу құралы. — Алматы: Эверо, 2013.

7. Charles Kittel. Introduction to Solid State Physics (8th Edition). — Wiley, 2004.
8. S.O. Kasap. Principles of Electronic Materials and Devices (4th Edition). — McGraw-Hill, 2017.
9. Ben G. Streetman, Sanjay Banerjee. Solid State Electronic Devices (7th Edition). — Pearson, 2014.
10. Yu. M. Tsidilkovskii. Band Structure of Semiconductors. — Pergamon Press, 1982.