

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Физика-техникалық факультеті

**Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика
кафедрасы**

Туреханова К.М.

ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

пәні бойынша дәрістер жинағы

«6B05306 Физика және астрономия» білім беру бағдарламасы
бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы, 2025

Дәріскер: Туреханова К.М. turekhanova.kunduz@kaznu.kz



ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ



Дәріс 5.

Металдар мен шалаөткізгіштердегі электр тогы.

Дәріс мақсаты: Металдар мен жартылай өткізгіштердегі электр тогының табиғатын, ток тасымалдаушылардың (электрондар мен кемтіктердің) рөлін, асқынөткізгіштік пен зоналық теория негіздерін түсіндіру.

Қарастырылатын мәселелер: Металл кристалдық торы, еркін электрондар және токтың пайда болуы; Классикалық теория мен тәжірибе қайшылықтары, асқынөткізгіштік құбылысы және оның механизмі (Купер жұптары); Таза (меншікті) жартылай өткізгіштердегі электрондар мен кемтіктер тогы, температураға тәуелділігі.

Қысқаша конспект:

Томсон мен Стюарт металдардағы ток тасымалдаушы зарядталған бөлшектер электрондар екенін 1916 жылы тәжірибе жүзінде көрсетті. Тәжірибеде өз осінен айнала алатын катушканы жылжымалы контакт арқылы гальванометрге қосады. Сол катушканы белгілі бір жылдамдыққа дейін айналдырып, оны кенеттен тежеген кезде гальванометр арқылы өтетін заряд шамасын анықтайды.

$$\frac{e}{m} = \frac{Lv_0}{qR}$$

Метал түйіндерінде иондар (атомдар) орналасқан кристалдық тордан және бүкіл торға қатысты еркін электрондардан тұрады деп қарастыруға болады. Еркін электрондар жылулық қозғалыс әсерінен тордың кез келген нүктесінде бола алады, ол иондар өздерінің орнықты орындарының әрлі берлі ауысып тербелмелі қозғалыста болады.

Элементар классикалық теория бойынша электрөткізгіштік келесідей анықталады:

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{e^2 \ln}{m_e v}$$

Сонда электрөткізгіштік темпператураның $\frac{1}{2}$ дәрежесіне $\sigma \sim 1/\sqrt{T}$ кері пропорционал екенін көреміз, бірақ ол тәжірибе бойынша $\sigma \sim 1/T$.

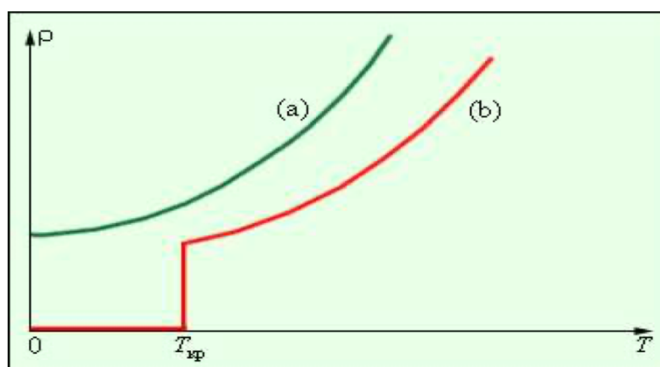
Тәжірибелер мен классикалық теория нәтижелері арасында тағы да басқа қайшылықтар бар. Мысалы, металдағы еркін электрондарды газ ретінде қарастырсақ онда бірлік көлемінің толық жылу сыйымдылығы

$C_V = (3/2)R + 3R$ болу керек, бірақ тәжірибелер бойынша металдардың жылу сыйымдылығының диэлектриктердің жылу сыйымдылығын

сипаттайтын $C_V = 3R$. Дюлонг-Пти заңына бағынатынын көрсетеді. Металдардың ішкі қайшылықтарсыз тәжірибе нәтижелерімен үйлесетін теориясын жасау үшін оның құрамына кіретін элементар бөлшектердің (электрондар, атомдар, иондар) кванттық қасиеттерін ескеру қажет болады.

Белгілі болғандай,

температураның артуы меншікті кедергінің өсуіне алып келеді (зоналық теория — төменде қараңыз). Алайда температура белгілі бір мәнге жақындағанда, кенеттен меншікті кедергі секірмелі түрде нөлге айналып, одан әрі абсолюттік нөлге дейін нөлге



тең қалпында қалады. Бұл құбылыс 1911 жылы таза металдарда Хайке Камерлинг - Оннес тарапынан ашылып, асқынөткізгіштік деп аталды. Төмен температураларда меншікті ρ кедергінің абсолютті температураға тәуелділігі: а – нормал металл; b – асқынөткізгіш.

Асқынөткізгіштіктің механизмі бойынша өте төмен температураларда электрондар мен кристалл торының арасындағы өзара әрекеттесу күшейіп, тор арқылы бір-бірімен әсерлесетін Купер жұптары түзіледі. Бұл жұптар бозондар, фермиондар емес, сондықтан Паулидің тыйым салу принципіне бағынбайды және энергетикалық деңгейлерде шектеусіз жинала алады. Нәтижесінде көптеген жұптар осы энергетикалық деңгейге өтеді де, асқынөткізгіштің кедергісі нөлге дейін төмендейді.

Металдар мен жартылай өткізгіштерде жүретін процестерді тереңірек талдау үшін, осы денелердегі валенттік электрондар ие бола алатын энергетикалық деңгейлердің құрылымын зерттеу қажет. Бір оқшауланған атомдағы валенттік электронның энергетикалық деңгейлері әртүрлі арақашықтықта бірінің астына бірі орналасқан көлденең сызықтардың жиынтығы түрінде көрсетілуі мүмкін. Ең төменгі деңгей, яғни энергиясы ең аз деңгей, негізгі немесе қозбаған деңгей деп аталады.

Енді N бірдей атомдарды бір-біріне жақындатып қарастырайық, сонда әрбір жеке деңгей N жеке деңгейге айналады. Берілген деңгейдің осылайша шашырап (ажырап) кетуінен пайда болған энергетикалық

деңгейлердің жиынтығы энергетикалық зона (аймақ) деп аталады. N өте үлкен және бір зонаның ішіндегі деңгейлердің арақашықтықтары өте жақын болғандықтан, электронды осы зонаның өз ішінде бір деңгейден екіншісіне көшіру үшін елеусіз ғана энергия жеткілікті. Осы мағынада бір зонаның ішіндегі энергетикалық деңгейлер іс жүзінде үздіксіз сияқты жүреді. Қатар жатқан энергетикалық зоналар шекті энергия аралықтарымен бөлінген. Бұл аралықтар тыйым салынған зоналар (аймақтар) деп аталады, себебі электрон энергиясы бұл аралықтардағы мәндерді қабылдай алмайды. Осындай ықшамдалған тәсілмен сипатталатын теория зоналық теория деп аталады.

Электр тогының өтуі үшін валенттік энергетикалық зона электрондармен толық емес, ішінара толтырылған болуы керек. Мұндай жағдай металдарда жүзеге асады, сондықтан олар ток өткізеді. Жартылай өткізгіштерде негізгі зона (валенттік зона) қозған деңгейлер зонасынан (өткізгіштік зона) шекті энергия аралығымен бөлінген. Абсолюттік нөл температурасында валенттік зона электрондармен толық толған, ал өткізгіштік зона мүлде бос болады. Сондықтан абсолюттік нөлде жартылай өткізгіштер электр тогын өткізбейді, яғни изолятор болып саналады. Изоляторлар жартылай өткізгіштерден тек тыйым салынған аймақтың ені үлкендігімен ерекшеленеді; шартты түрде тыйым салынған аймағының ені 2 эВ-тен асатын жартылай өткізгіштерді изоляторға жатқызады.

Температура артқанда электрондар кристалл торының иондарымен энергия алмаса бастайды, соның нәтижесінде электрон шамамен $k_B T$ қосымша кинетикалық энергия ала алады. Бұл энергия кейбір электрондарды валенттік зонадан өткізгіштік зонаға көтеруге жеткілікті болуы мүмкін. Өткізгіштік зонаға өткен мұндай электрондар электр тогын өткізе бастайды.

Сонымен таза жартылай өткізгіштердегі ток тасымалдайтын бөлшектер өткізгіштік зонадағы электрондар мен валенттік зонадағы кемтіктер болып табылады. Таза жартылай өткізгіштердің электрөткізгіштігін меншікті өткізгіштік деп атайды.

Таза жартылай өткізгіште өткізгіштік әрі кемтіктердің де, әрі электрондардың есебінен жүзеге асады. Егер жартылай өткізгішке, мысалы валенттілігі 4 болатын германийге, валенттілігі 5 болатын фосфор сияқты қоспа енгізілсе, онда оның өткізгіштігі артады; бұл тыйым салынған аймақта өткізгіштік зонасына жақын орналасатын қосымша энергетикалық деңгейлердің пайда болуына байланысты. Егер қоспа үш валентті болып, германийге қосылса, қосымша энергетикалық деңгейлер валенттік зонаға жақын түзіледі. Бірінші жағдайда n -типті, ал екінші жағдайда p -типті жартылай өткізгіш (тиісінше донорлық және акцепторлық) алынады. Мұндай жартылай өткізгіштердегі өткізгіштік негізгі және негізгі емес тасымалдаушылар тоқтарының қосындысынан тұрады: мысалы, p -типті жартылай өткізгіште негізгі тасымалдаушылар — кемтіктер, ал негізгі

еместері — электрондар. Жартылай өткізгіштегі ток температурға келесідей тәуелді болады:

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{e\Delta\varphi}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

мұндағы J_0 - негізі емес тасымалдаушылардың тогы, ал $\Delta\varphi$ - потенциалдар айырымы.

p және n типті екі жартылай өткізгішті (диод) қарастыратын болса, онда біріншісінде негізгі тасымалдаушылар – кемтіктер, ал екіншісінде – электрондар. Контакт аймағында кемтіктердің бір бөлігі n-типті жартылай өткізгішке, ал n-типтегі тасымалдаушылардың бір бөлігі p-типті жартылай өткізгішке өтеді. Бұдан кейін шекарада бөгеттік потенциал (тоқтатушы кернеу) пайда болғандықтан, зарядтардың диффузиясы тоқтайды. Егер жартылай өткізгіштік контактқа тура бағытта кернеу берсек (минус – донорлық, яғни n-типке; плюс – акцепторлық, яғни p-типке), тізбекте негізгі тасымалдаушылардың тогы ағады. Керісінше, кері бағытта кернеу берілсе тек негізгі емес тасымалдаушылардың тогы ғана өте алады және оның мәні негізгі тасымалдаушылар тогынан әлдеқайда кіші болады. Демек, жартылай өткізгіштік контактқа айнымалы ток берілсе, бұл контакт айнымалы токты түзетеді.

Транзистор — p–n–p немесе n–p–n құрылымды үш қабатты жартылай өткізгіш элемент, ол әлсіз басқарушы сигналмен үлкен токты басқаруға мүмкіндік береді. Сондықтан ол әрі күшейткіш, әрі электрондық қосқыш (кілт) ретінде қолданылады.

Биполярлық транзисторда базаға берілген шағын ток эмиттер–коллектор тармағындағы үлкен токты басқарады; өрістік транзисторда қақпа кернеуі арнаның өткізгіштігін өзгертеді. Транзисторлар аудио күшейткіштерден бастап микроконтроллердер мен процессорлар логикасына дейін барлық электроникада қолданылады. Қазіргі микросхемалардың өзінде миллиардтаған транзистор бар

Бақылау сұрақтары:

1. Өткізгіштер мен жартылай өткізгіштердегі электр токтарының табиғаттары қандай?
2. Асқынөткізгіштің құбылысын түсіндіріңіз.
3. Зоналық теория нені сипаттайды?
4. Диод пен транзистор қалай жұмыс жасайды?

Пайдаланылған әдебиеттер:

1. Бәйімбетов Ф.Б., Рамазанов Т.С. Электр және магнетизм. – Алматы: Қазақ университеті, 2011. – 199 б.

Дәріскер: Туреханова К.М. turekhanova.kunduz@kaznu.kz

2. Бәйімбетов Ф.Б., Аймауытов Д., Құрманбеков А. Физика есептері (Электр және магнетизм). – Алматы: Қазақ университеті, 2005. – 216 б.
3. Архипов Ю.В. Краткий конспект лекций по курсу "Электричество и магнетизм" : учеб.-методическое пособие КазНУ 2009
4. Габдуллина Г.Л., Қисан А., Абыканова Б.Т. Электр және магнетизм курсы бойынша қысқаша дәрістер мен есептер жинағы : оқу-әдістемелік құрал, Әл-Фараби атын. ҚазҰУ. - Алматы : Қазақ ун-ті, 2017. - 161 б.
5. Туреханова К.М. Электр және магнетизм курсы бойынша есептер жинағы/ Оқу құралы, әл-Фараби атын. ҚазҰУ. - Алматы : Қазақ ун-ті, 2017. – 191 б.
6. Raymond A. Serway, John W. Jewett, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9th ed. – Cengage Learning, 2014. – 1622 p.