

Қазақстан Республикасы білім және ғылым министрлігі

«Алматы энергетика және байланыс университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

**Ө.М. Матаев, Б.Қ. Курпенев, А.А. Абдурахманов.**

**ЭЛЕКТРТЕХНИКАЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ**

Оқу құралы

Алматы  
АЭЖБУ  
2015

**ӘОЖ [621.315.5/6+621.318+669] (075.8)**

**КБЖ 31.2**

**М 33**

**Пікір берушілер:**

техника ғылымдарының докторы, ғылыми зерттеу институты бастығының  
орынбасары

**Омаров Р.М**

техника ғылымының кандидаты, ҚазҰАУ, ЭҰЖА кафедрасының доценті,

**Умбеткулов Е.К**

химия ғылымының кандидаты, АЭЖБУ «Электротехниканың теориялық  
негіздері» кафедрасының доценті

**Е.Ғ. Надиров**

Алматы энергетика және байланыс университетінің Ғылыми кеңесі басуға  
ұсынды (17.03.2015 ж. №9 хаттама). АЭЖБУ 2015 ж. ведомостік әдебиеттер  
басылымдарн шығарудың тақырыптық жоспары бойынша басылады, реті 7.

**Матаев Ө.М., Курпенев Б.Қ., Абдурахманов А.А.**

**М 33** Электртехникалық материалтану. Оқу құралы: (5В071800 - Электр  
энергетикасы, 5В081200 - Ауыл шаруашылығын энергиямен қамтамасыз ету  
мамандықтарының студенттеріне арналған)/ Матаев Ө.М., Курпенев Б.Қ.,  
Абдурахманов А.А. - Алматы: АЭЖБУ, 2015 ж. – 49 б. көр. 17, кесте 1,  
әдеб.көрсеткіш - 9 атау.

**ISBN 978 – 601 – 7436 – 62 – 9**

Ұсынылып отырған оқу құралында оқу бағдарламасына сәйкес төрт  
бөлім кірген: «Диэлектриктер», «Жартылай өткізгіштер», «Өткізгіштер» және  
«Магниттік материалдар».

Оқу құралына теориялық материалдар, типтік бағдарламаның шегінен  
шықпайтын күрделілігі әртүрлі есептер ендірілген. Сондықтан Есептерді  
шығарудың алдында ұсынылған оқулықтардың, осы оқу құралының немесе  
лекциялар конспектісінің тиісті бөлімінің материалдарымен танысқан жөн.

**ӘОЖ [621.315.5/6+621.318+669] (075.8)**

**КБЖ 31.2 я73**

**ISBN 978 – 601 – 7436 – 62 – 9**

©АЭЖБУ

Матаев Ө.М.

Курпенев Б.Қ

Абдурахманов А.А., 2015

Өмірбек Матайұлы Матаев,  
Бақыт Қасымұлы Курпенов  
Абдуғани Абдужалилұлы Абдурахманов.

## ЭЛЕКТРТЕХНИКАЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

Оқу құралы

Редактор

Б.С.Қасымжанова

Басуға \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ ж. қол қойылды.  
Таралымы 100 дана. Пішімі 60x84 1/16

Баспаханалық қағаз №2  
Есептік – баспа табағы 3,0. № \_\_\_\_ тапсырыс  
Бағасы \_\_1500\_\_ теңге.

«АЭЖБУ» коммерциялық емес АҚ  
Алматы қ., Байтұрсынұлы көшесі, 126

«Алматы энергетика және байланыс университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамының  
көшірмелі-көбейткіш бюросы  
Алматы қ., Байтұрсынұлы көшесі, 126

**Кіріспе**

«Электртехникалық материалтану» пәні 5B071800 – «Электр энергетикасы», «Ауыл шаруашылығын энергиямен қамтамасыз ету» мамандықтарының студенттері оқитын базалық пәндердің бірі болып табылады.

Бұл курс төрт бөлімнен тұрады: «Диэлектриктер», «Жартылай өткізгіштер», «Өткізгіштер» және «Магниттік материалдар».

Оқу құралына теориялық материалдар, күрделілігі әртүрлі есептер ендірілген, бірақ оларды шығару үшін типтік бағдарламаның шегінен шығатын білім қажет емес. Сондықтан есептерді шығаруға кіріспей тұрып, ұсынылған оқулықтардың, осы оқу құралының немесе лекциялар конспектісінің тиісті бөлімінің материалдарымен танысу керек.

Оқу құралының әр бөлімі типтік есептерден басталады, оларға шешулері берілген. Типтік есептерді талдап, тек жауаптары берілген есептерді шығарып көріңіз.

**Электрлік қасиеттері бойынша заттардың топталуы**

Электрлік қасиеттеріне байланысты барлық заттар диэлектриктер, өткізгіштер және жартылай өткізгіштерге бөлінеді. Олардың арасындағы айырмашылықты тиімді түрде қатты денелердің зоналық теориясының энергетикалық диаграммасымен көрсетуге болады.

Әртүрлі заттардың газ тәрізді күйінде, яғни атомдары бір-бірінен үлкен қашықтықта орналасқанда сәулелену спектрлерінің зерттеуі әрбір заттың атомдары үшін белгілі спектральдік түзулер сипаты екенін көрсетеді. Бұл әрбір атомдар үшін белгілі бір энергетикалық күйдің деңгейі болатындығын білдіреді.

Бұл деңгейлердің бір бөлігі атомның қозбаған күйдегі электрондарымен толтырылған, басқа деңгейлерінде электрондар тек қана атом сыртқы энергетикалық әсерге ұшырағаннан кейін, яғни қозған кезде ғана орналаса алады.

Тұрақты күйге келуге ұмтылған кезде, яғни электронның атом энергиясы минималды болатын деңгейіне орналасу мезетінде, атом артық энергияны шығара бастайды. Газ тәрізді заттың сұйық күйге өткенінде, одан кейін қатты заттың кристалдық торының құрылуы кезінде, көршілес атомдардың бір-біріне әсер етуінен берілген атомдағы барлық электрондық деңгейлер біраз ығысады. Осының нәтижесінде қатты денедегі жекеленген атомдардың энергетикалық деңгейлерінен бүтін жолақ энергетикалық деңгейлер аумағы пайда болады.

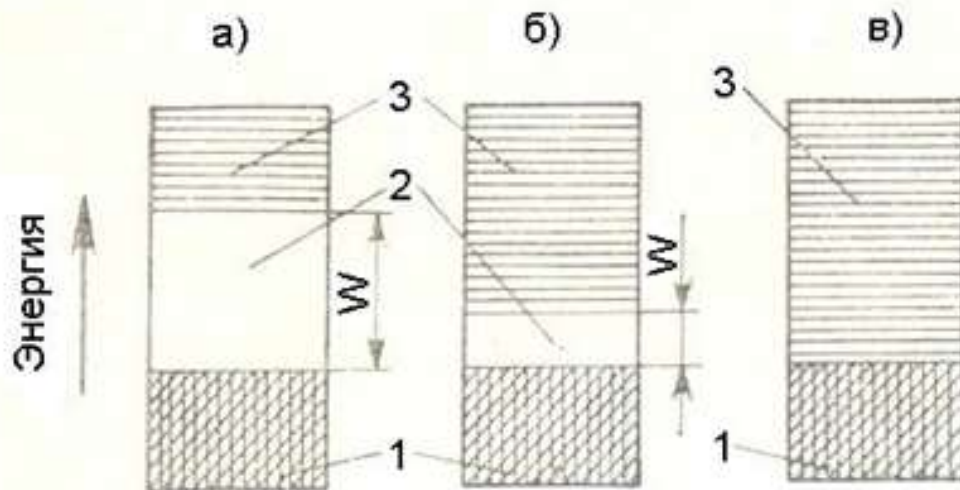
Диэлектриктердің, жартылай өткізгіштердің және өткізгіштердің энергетикалық диаграммалары әртүрлі.

Диэлектриктер деп тыйым салынған, аумағы жоғары, қалыпты жағдайда электрондық электр өткізгіштігі байқалмайтындай материалдарды атайды.

Жартылай өткізгіш материалдарда тыйым салынған аумағының ені кішірек болады. Электрондар сыртқы энергетикалық әсер арқылы тыйым салынған аумақтан өте алады.

Өткізгіш материалдарда электрон толтырылған зона бос энергетикалық зонасымен түйісіп жатады.

Осы себепті металдардағы электрондар бос болады, электр өрісінің кернеулігі әлсіз болса да, оның әсерінен толық зона деңгейінен бос деңгейге өте алады.



1.1 сурет - Диэлектриктердің, жартылай өткізгіштердің және өткізгіштердің энергетикалық диаграммалары

Жартылай өткізгіштерде бос электрондар болмаса, оған берілген потенциалдар айырмасы ток тудыра алмайды. Егер сырттан электрондар тыйым салынған аймақтан лақтыру үшін жеткілікті энергия берілсе, онда бос қалған электрондар еркін жылжи алады және электр өрісінің әсерімен жартылай өткізгіштің электрондық электр өткізгіштігін тудырады. Электрон айырылып кеткенде толтырылған аймақта «электронды кемтік» пайда болады. Осының нәтижесінде жартылай өткізгіштер электрондарының «эстафеталық» қозғалысы басталады. Олар пайда болған кемтіктерді толықтырады және де электрлік өріс әсерімен кемтік, эквивалентті оң заряд ретінде өріс бағытымен қозғалып отырады. Электрондардың еркін күйге өту үрдісі кері құбылыспен, яғни электронның қалыпты күйіне қайтуымен қоса жүреді. Нәтижесінде затта тепе-теңдік құрылады, яғни бос аймаққа ауысатын электрондар саны толтырылған аймаққа кері қайтатын электрондар санына тең болады.

Температураның жоғарылауымен жартылай өткізгіштің бос электрондар саны жоғарылайды, ал температураның абсолютті нөлге дейін төмендеуінен нөлге дейін кемиді. Сонымен, әртүрлі температураға сай заттардың электр өткізгіштігі әртүрлі болады. Электронды бос күйіне ауыстыру үшін немесе кемтіктің құрылуы үшін қажетті энергияны тек жылулық қозғалыс қана емес, энергияның басқа да көздері, мысалы, жарық, электрондар және ядролы бөлшектердің ағыны, магниттік өрістер, механикалық әсерлер және т.б. жеткізе алады. Электрлік қасиеттер зат атомдарының өзара әсерлер шарттарымен анықталады және берілген атомның міндетті түрдегі ерекшелігі болып табылмайды. Мысалы, көміртегі алмаз ретінде диэлектрик болып табылады, ал графит түрінде жоғары өткізгіштікке иемденеді.

Кристалды тордың қоспалары мен ақаулары қатты денелердің электрлік қасиеттеріне қатты әсер етеді.

## Магниттік қасиеттері бойынша заттардың топталуы

Магниттік қасиеттері бойынша материалдар әлсіз магнитті (диамагнетиктер және парамагнетиктер) және күшті магнитті (ферромагнетиктер және ферримагнетиктер) болып бөлінеді.

$\mu < 1$  заттар диамагнетиктер. Магниттік өтімділіктің мәні сыртқы магнит өрісінің кернеулігіне тәуелді емес. Бұларға *сутегі, инертті газ, көптеген органикалық қоспалар, тас тұзы* және метал түрлері: *мыс, мырыш, күміс, алтын, сынап және де висмут, галий, сурьма* жатады.

Магниттік өтімділігі  $\mu > 1$  заттарға парамагнетиктер жатады және оның мәні де сыртқы магнит өрісінің кернеулігіне тәуелді емес болады. Оларға оттегі, азот тотығы, темір тұзы, кобальт, никель және сирек кездесетін элементтер, метал сілтiсi, алюминий, платина жатады.

Диамагнетиктер мен парамагнетиктердің 1 жақын магниттік өтімділігі болады және де олардың магниттік қасиеттері бойынша техникада шектеліп қолданылады. Оларға темір, никель, кобальт, солардың балқымалары, хром және марганецтің балқымалары, ферриттер т.б. жатады. Магниттік өтімділігі  $\mu \geq 1$  заттар қатты магнит заттарға жатады.

### 1 Диэлектриктер

Диэлектриктер – жоғары меншікті кедергісі  $\rho$  бар заттар. Арналымы – электр тізбектерін бөлу, өткізетін тізбектерді оқшаулау. Конденсаторларда тапсырылған сыйымдылықты жасауға міндетті.

Активтік (белсенді) диэлектриктер – олардың қасиеттерін басқаруға болады. Олар электр сигналдарын өндіруге, түрлендіруге арналған.

Оларға лазер мен мазерлер, сегнетоэлектриктер, пьезоэлектриктер, пироэлектриктер, электрооптикалық және сызықты емес оптикалық материалдар, электреттер және басқалар жатады.

Органикалық диэлектриктер – көміртегімен (C) – сутегінің (H<sub>2</sub>), оттегінің (O<sub>2</sub>), азоттың (N<sub>2</sub>) және басқа элементтердің қосылыстары.

Органикалық емес диэлектриктер – олардың көбісі кремнийден, алюминий тотығынан (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), басқа металдардың тотықтарынан тұрады. Бұлар икемді емес, омырылғыш (фарфор, шыны, кварц және т.б.). Бірақ бұлардың қызуға шыдамдылығы жоғары.

Электрлік қасиеттері:

- 1) полярлануы;
- 2) электр өткізгіштігі;
- 3) диэлектрлік шығындары;
- 4) тесілуі;
- 5) электрлік беріктілігі.

Физикалық – механикалық және химиялық қасиеттері:

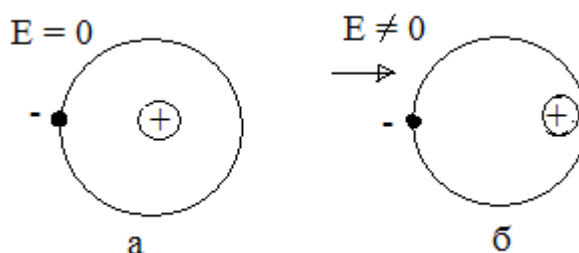
- 1) механикалық;
- 2) тұтқырлығы;

- 3) жылу;
- 4 химиялық;
- 5 радиациялық төзімділігі.

## 1.2 Диэлектриктің өрістенуі және оның электр өтімділігімен байланысы

Барлық диэлектриктер байланысқан электрлік зарядтарға ие: атомдардың теріс зарядталған электрондық қабыршақтары және оң зарядталған атомдық ядролар. Электр өрісіне диэлектриктер қосылмаған кезде осы зарядтар концентрлік күйде орналасқан, сондықтан атомдар электрлік нейтралды.

Электр өрісінің әсерінен диэлектриктегі бөгелмелі электр зарядтар әсер еткен күштің бағытымен ығысады. Ол ығысудың шамасы өріс кернеулігінің мөлшерімен байланысты. Егер электр өрісінен ажыратса, онда жаңағы зарядтар өз қалпына қайтадан оралады да, қайтадан атомдар электр нейтралды болады. Дипольды молекулалар немесе полярлы диэлектриктер, электр өрісінің арқасында өріспен бағыттасады. Егер де өрістен сондай диэлектриктерді ажыратсақ, жылулық қозғалыстың әсерінен дипольдар бейберекет болып бағытын жоғалтады. Диэлектриктер зарядтары көбісінің ығысуы өрістің кернеулігімен сызықты байланысады.



1.2 сурет - Өрістенген атомның сұлбасы

Ерекше топқа сегнетоэлектриктер жатады, олардың диэлектрлік ығысуы кернеуліктің өзгеруіне қисық сызықты тәуелді және өрістің бір мезетінде ығысуы қанығады. Ондай байланыс бірінші рет сегнет тұзында байқалған, сондықтан осы топқа сәйкес келетін диэлектриктерді «сегнетоэлектрик» дейді.

Диэлектрлік өтімділік ( $\epsilon$ ) – заттан қандай сыйымдылық алуға болатынын және өрістенудің дәрежесін көрсетеді. Диэлектрлік өтімділігінің ( $\epsilon$ ) макроскопиялық шамасымен диэлектриктердің өрістену дәрежесі анықталады:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (1.1)$$



мұнда  $C$  – диэлектрик толтырылған конденсатор сыйымдылығы;  
 $C_0$  – электродтардың арасында вакуум бар конденсатордың сыйымдылығы.

Ал, конденсатор дегеніміз екі жағына электрод қосқан диэлектрик. Электр тізбекке қосылған электродтары бар кез келген диэлектрик, белгілі бір сыйымдылықты конденсатор ретінде қарастыра алады.

Конденсатордың заряды:

$$Q = CU \quad (1.2)$$

мұндағы  $C$  – конденсатор сыйымдылығы,  $U$  – оған келтірілген кернеу. Келтірілген кернеудің берілген мәніндегі электр саны  $Q$  екі құрастырушыдан тұрады: біріншісі вакуум бөліп тұрғанда бар болатын заряд  $Q_0$ , екіншісі электродтарды шын мәнінде бөліп тұратын, диэлектриктің өрістенуімен бейімделген құрастырушы  $Q_d$ . Сонда

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (1.3)$$

Техника үшін ерекше маңызы бар, диэлектриктер сипаттамаларының бірі - оның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ( $\varepsilon$ ). Бұл шама белгілі бір кернеуде алынған электродтардың арасында диэлектригі бар конденсатордың заряды  $Q_d$ , дәл сондай шарттағы, бірақ та электродтарының арасында вакуум бар конденсатордың заряды  $Q_0$  қатынасы болып табылады:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (1.4)$$

Әрбір заттың диэлектрлік өтімділігі «1» көп болуы керек.

Жоғарыда көрсетілген (1.1) теңдікті былай деп көрсетуге болады:

$$Q = Q_0 \varepsilon_r = CU = C_0 U \varepsilon_r, \quad (1.5)$$

мұнда  $C_0$  – электродтардың арасында вакуум бар конденсатордың сыйымдылығы.

Диэлектриктің өтімділігі заттың табиғаты және сипатымен байланысты. Құрамы күрделі, қатты диэлектриктердің диэлектрлік өтімділігін (компоненттердің қоспалары) ығысу логарифмдік заңының негізімен анықтауға болады:

$$\varepsilon_r^x = \theta_1 \varepsilon_{r1}^x + \theta_2 \varepsilon_{r2}^x, \quad (1.6)$$

мұндағы  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$  – жеке компоненттердің диэлектрлік өтімділігі;  
 $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – компоненттердің көлемдік мөлшері;

$\chi$  – компоненттердің диэлектрикте бөліп тарату тұрақтысы, мағынасы (+1) (-1) дейін, жалпы  $(\theta_1 + \theta_2) = 1$ .

$\varepsilon$  – тәжірибе жүзінде анықталады. Ең қолайлы да, оңай өлшеу тәсілі – диэлектрикті конденсатордың сыйымдылығын айнымалы токтың теңдестіру көпірі арқылы өлшеу тәсілі.

Конденсатордың заряды:

$$Q = CU;$$

$$Q = Q_o + Q_d;$$

$Q_o$  – вакуумде,  $Q_d$  – диэлектрикте.

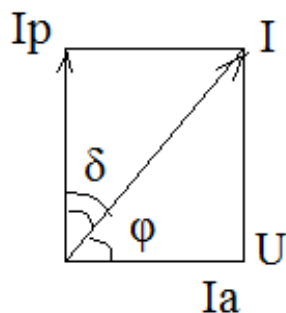
Салыстырмалы диэлектрлік өтімділік:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_o} = \frac{Q_o + Q_d}{Q_o};$$

$$\varepsilon = C_x 4\pi\delta / S\varepsilon_o.$$

Диэлектрлік шығындар деп уақыт бірлігінде электр өрісі әсер еткенде диэлектрлікте сейілетін энергияны айтады.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_p}$$



Ылғалдық өскен сайын диэлектрлік өтімділік ұлғаяды. Бұл ұлғаю температура өскен сайын күшейеді. Диэлектрлік өтімділіктің температурадан тәуелдігі мынадай теңдестікпен анықталады:

$$TK\varepsilon_r = \alpha_{\varepsilon_r} = \frac{I}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{dT}. \quad (1.7)$$

(1.7) формуламен температураны 1 градусқа көтергенде диэлектрлік өтімділікті есептеуге болады. Осы анықтаманы диэлектрлік өтімділіктің температуралық коэффициенті дейміз.

Полярлы емес газдың ТК $\varepsilon$  былай есептеуге болады:

$$TK\varepsilon_r = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{T}.$$

Температура  $20^0$  С ауа үшін:

$$TK\varepsilon_r = \frac{1,00058 - 1}{293} = -2 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Диэлектрлік өтімділіктің қысымдыққа қатынасы мына формуламен есептеледі:

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{dp} = \frac{\varepsilon - 1}{\rho}.$$

Қысымдық  $P = 0,1$  МПа ауа үшін:

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{d\varepsilon_r}{d\rho} = \frac{1,00058 - 1}{0,1} = 0,0058 \text{ МПа}^{-1}.$$

Молекулалардың саны  $n_0$  1 көлем бірлігінде негізгі газ заңдарымен анықталады:

$$n_0 = \frac{P}{(kT)}.$$

## Есептер

### Диэлектриктердің полярлануы

Біртекті электр өрісінің кернеулігіне  $E_0 = 100$  В/м перпендикуляр диэлектрлік өтімділігі  $\varepsilon = 2$  изотроптық диэлектриктің қиындысы орналасқан. Анықтау керек: қиынды ішіндегі өріс кернеулігін  $E$  және электрлік ығысуды (электр индукциясын)  $D$ ; б) диэлектриктің полярлығын  $P$  және байланысқан зарядтардың беттік тығыздығын  $\sigma$ .

Шешуі:

а) Диэлектриктегі орташа макроскопиялық электр өрісі  $E$  сыртқыдан  $\varepsilon$  есе аз:  $E = 100/2 = 50$  В/м. Диэлектриктердің көбісі үшін полярлығы өріс кернеулігіне пропорционалды:

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1)E = 8,85 \cdot 10^{-12} (2-1) \cdot 50 = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

Изотропты диэлектриктерде электр өрісі кернеулігі және полярлығы векторларының бағыттары сәйкес, ал электрлік ығысуы:

$$D = \epsilon_0 E + P = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50 + 4,42 \cdot 10^{-10} = 8,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

б) Біртекті жалпақ диэлектриктің бірқалыпты электр өрісіндегі полярлығы байланысқан зарядтардың беттік тығыздығына тең  $\sigma = P = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2$ .

Электр өрісінің әсерінен иондардың теңгерім жағдайынан ығысуы жақын көрші иондардың арасындағы қашықтықтан 1% құрайды деп есептеп, тас тұзы монокристалының полярлығын есептеу керек. Кристалдың қарапайым ұяшығының формасы куб тәріздес, көрші иондардың арасындағы қашықтық  $a = 0,28 \text{ нм}$ .

Шешуі:

Диэлектриктің полярлығы  $P$  санмен диэлектрик элементінің электрлік иінкүшінің  $dp$  осы диэлектриктің  $dV$  көлемінің қатынасына тең:  $P = dP/dV$ . Егер  $dV = a^3$  таңдаса, онда  $dp = q\Delta x$ , мұнда  $q$  – электронның зарядына тең ионның заряды;  $\Delta x$  – өрістің әсерінен иондардың ығысуы. Онда

$$P = \frac{q\Delta x}{a^3} = \frac{1,6 \cdot 2,810^{-10} \cdot 10^{-2}}{(0,28 \cdot 10^{-9})^3} \approx 0,02 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Алдындағы есептегі шарттармен тас тұзының монокристалына әсер жасайтын электр өрісінің кернеулігін анықтау керек, егер оның электрлік өтімділігі  $\epsilon = 5,65$  болса. Ішкі электр өрісінің шамасы сыртқы электр өрісінің шамасына тең деп есептеп, кристалдағы иондардың серпімді байланысының  $k_{\text{упр}}$  коэффициентін есептеу керек.

Шешуі:

Диэлектриктің полярлығы электр өрісінің кернеулігіне пропорционалды. Осыдан

$$E = \frac{P}{\epsilon_0(\epsilon - 1)} = \frac{0,02}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,65 - 1)} = 4,85 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Өрістің әсерінен иондардың ығысуына серпімді байланыстың күштері кедергі жасауына байланысты, теңгерімдік жағдайда  $qE = k_{\text{упр}}\Delta x$ . Осыдан

$$k_{\text{упр}} = \frac{qE}{\Delta x} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,85 \cdot 10^8}{0,28 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-2}} = 27,7 \text{ Дж/м}^2.$$

Ауалық аралықсыз жалпақ конденсатордың қиындыларының арасында қалыңдығы  $h = 1 \text{ мм}$  гетинакс парағы қысылған. Конденсаторға  $U = 220 \text{ В}$  кернеу берілген. Конденсатордың қиындыларындағы  $\sigma_1$  және диэлектриктегі  $\sigma_d$  зарядтың беттік тығыздығын анықтау керек. Материалдың диэлектрлік өтімділігі  $\epsilon$  тең деп қабылдансын.

300 К және қалыпты атмосферлік қысымда ауаның диэлектрлік өтімділігі  $\varepsilon = 1,00058$ . Оның шамасы қаншаға өзгереді, егер ауаның қысымын 20 есе көбейтсе?

Шешуі:

Газдың  $\varepsilon$  диэлектрлік өтімділігінің  $p$  қысымынан тәуелділігі:  $d\varepsilon/dp = (\varepsilon - 1)/p$ . Осыдан

$$\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon - 1} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}; \quad \ln \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_1 - 1} = \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$\varepsilon_2 - 1 = (\varepsilon_1 - 1) \frac{p_2}{p_1} = (1,00058 - 1) \cdot 20 = 0,0116.$$

Сонымен, қысым 20 есе көбейгенде ауаның диэлектрлік өтімділігі  $\varepsilon_2 = 0,0116$  мәніне дейін өседі.

Композициялық керамикалық материал диэлектрлік өтімділіктері  $\varepsilon_1 = 40$  және  $\varepsilon_2 = 80$  екі диэлектриктің негізінде жасалған. Компоненттердің бейберекет таралуын ескеріп, керамиканың құрамын анықтау керек, егер  $\alpha_{\varepsilon 1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ ;  $\alpha_{\varepsilon 2} = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ .

Композициялық диэлектриктің диэлектрлік өтімділігі неге тең?

Шешуі:

$\varepsilon$  есептеу үшін Лихтенеккердің формуласын  $\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \ln \varepsilon_2$  түрінде пайдаланады, мұнда  $\theta_1$  және  $\theta_2$  – компоненттердің көлемдік шоғырлануы.

Композициялық диэлектрик  $\varepsilon$  температуралық коэффициентін Лихтенеккердің формуласын дифференциалдап, есептеуге болады:  $\alpha_\varepsilon = \theta_1 \alpha_{\varepsilon 1} + \theta_2 \alpha_{\varepsilon 2}$ .

Теңдеулер жүйесін шешіп:

$$\begin{aligned} \theta_1 \alpha_{\varepsilon 1} + \theta_2 \alpha_{\varepsilon 2} &= 0; \\ \theta_1 + \theta_2 &= 1, \end{aligned}$$

термоөтемделген материал үшін табады:

$$\theta_1 = \varepsilon_2 / (\alpha_{\varepsilon 2} - \alpha_{\varepsilon 1}) = 0,882; \quad \theta_2 = 0,112; \quad \varepsilon = 40.$$

### 1.3 Диэлектриктердің электрөткізгіштігі

Меншікті көлемді кедергісі  $\rho_V = 10^{10}$  Ом·м және меншікті беттік кедергісі  $\rho_S = 10^{11}$  диэлектрлік материалдан жасалған қабырғасы  $a = 10$  мм кубтың екі қарама – қарсы қабырғалары метал электродтарымен қапталған.

Кубтың осы қапталдарынан өтетін токты  $U_0 = 2$  кВ тұрақты кернеуінде анықтау керек.

Шешуі:

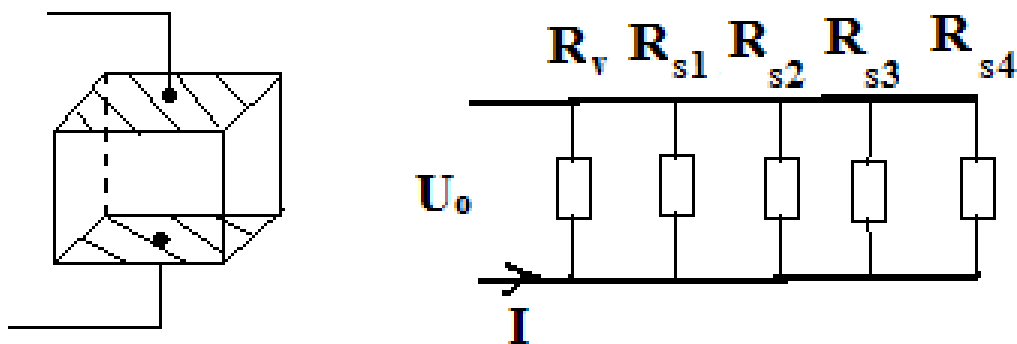
Электр тогы кубтың көлемінен және төрт қапталдың бетінен өтеді. Сондықтан электродтардың арасындағы кедергі көлемдік кедергі мен төрт қапталдың беттік кедергілерін параллель қосылуымен анықталады. Онда

$$R_V = \rho_V a / a^2 = \rho_V / a = 10^{10} / 10 \cdot 10^{-3} = 10^{12} \text{ Ом},$$

$$R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = R_{S4} = \rho_S a / a = \rho_S = 10^{11} \text{ Ом},$$

$$R_{из} = R_V R_{S1} / (R_{S1} + 4 R_V) = 10^{12} \cdot 10^{11} / (10^{11} + 4 \cdot 10^{12}) = 2,44 \cdot 10^{10} \text{ Ом},$$

$$I = U_0 / R_{из} = 2 \cdot 10^3 / 2,44 \cdot 10^{10} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ А}.$$



Ауданы  $S = 2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  жалпақ электродтар арасында әртүрлі диэлектрик материалдарынан жасалған тізбектеліп жалғанған екі қиынды орналасқан. Олардың біреуінің диэлектриктік өтімділігі  $\epsilon_1 = 2$ ; меншікті өткізгіштіктігі  $\gamma_1 = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ; қалыңдығы  $h_1 = 1 \text{ см}$ ; екіншісінікі:  $\epsilon_2 = 2$ ;  $\gamma_2 = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ;  $h_2 = 2 \text{ см}$ .  $t = 0$  уақытында.

Температураның  $60 - \text{тан } 127^\circ\text{C}$  дейін өзгергенде радиофарфордың меншікті кедергісі  $\rho_1 = 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – ден  $\rho_2 = 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  дейін азаяды. Радиофарфордың меншікті кедергісінің температуралық коэффициентін  $\alpha_p$  анықтау керек, температуралардың қарастырылатын аралығында оны тұрақты деп есептеп. Осы долбарда бөлме температурасындағы материалдың меншікті кедергісін табу керек.

Иондау камерасының әр электродының ауданы  $S = 100 \text{ см}^2$ , электродтардың арасы  $l = 6,2 \text{ см}$ .  $U = 20 \text{ В}$  кернеуінде электродтар арасында қандай ток болады, егер иондағыш секунд сайын газдың  $1 \text{ см}^3$  әр таңбаның  $N = 10^9$  бірваленттік иондарын жасаса? Оң және теріс иондардың жылжымалылығы  $\mu_+ = \mu_- = 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ , рекомбинация коэффициенті  $\nu = 10^{-12} \text{ м}^3 / \text{с}$ . Табылған ток қанығу тогының қандай үлесін құрайды?

## 1.4 Диэлектрлік шығындар

Бөлме температурасында ультрафарфордың диэлектрлік шығындары бұрышының тангенсы  $\operatorname{tg}\delta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ , ал температура  $100^\circ \text{C}$  көтерілгенде ол екі есе өседі. Осы материалдың  $\operatorname{tg}\delta$   $200^\circ \text{C}$  неге тең? Осы материалдан жасалған жоғарыжиіліктік өтпелі оқшаулағышта бөлінетін активтік қуат неше есе көбейеді, егер температура 20 және  $200^\circ \text{C}$  дейін өзгерсе? Керамиканың диэлектрлік өтімділігі өзгермейді деп есептелсін.

Шешуі:

Ультрафарфордағы шығындар өткін электрөткізгіштігінен пайда болады, сондықтан диэлектрлік шығындары бұрышының тангенсы температурамен бірге экспоненциалдық заңмен көбейеді:  $\operatorname{tg}\delta_T = \operatorname{tg}\delta_0 \exp[a(T - T_0)]$ , мұнда  $\operatorname{tg}\delta_0 - T_0 = 20^\circ \text{C}$  болғандағы мән;  $a$  –  $\operatorname{tg}\delta$  температуралық коэффициенті, ол өрнектен табылуы мүмкін:

$$a = \frac{\operatorname{Intg}\delta_{100} - \operatorname{Intg}\delta_0}{100 - 20} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Онда  $\operatorname{tg}\delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$ .

Оқшаулағышта бөлінетін активтік қуат  $P_a$  температурамен бірге  $\operatorname{tg}\delta$  пропорционалды өседі. Сондықтан:

$$\frac{P_{a200}}{P_{a0}} = \frac{\operatorname{tg}\delta_{200}}{\operatorname{tg}\delta_0} = \frac{2,38 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,76.$$

Жиілігі  $f = 1 \text{ МГц}$   $U = 100 \text{ В}$  айнымалы кернеуге қосылған сыйымдылығы  $C = 100 \text{ пФ}$  дискілі керамикалық конденсаторда  $P_a = 10^{-3} \text{ Вт}$  қуаты сейіледі. Диэлектриктегі меншікті шығындарды анықтау керек, егер оның диэлектрлік өтімділігі  $\epsilon = 150$ , электрлік беріктілігі  $E_{\text{пр}} = 10 \text{ МВ/м}$  және электрлік беріктілігі бойынша қоры  $K = 10$  тең болса.

Ауданы  $S$  жез электродтар арасында қалыңдығы  $h = 5 \text{ мм}$  керамикалық қиынды орнатылған, оның диэлектрлік өтімділігі  $\epsilon = 7$ , бөлме температурасындағы диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсы  $\operatorname{tg}\delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ , температуралық коэффициенті  $\alpha_{\operatorname{tg}\delta} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .  $f = 50 \text{ МГц}$  жұмыс жиілігінде электродтар арасындағы рұқсат етілген  $U$  кернеуін анықтау керек, егер электр өрісіндегі қиындының температурасы  $T = 373 \text{ К}$  аспаса. Есепте диэлектриктен сыртқы ортаға жылу берілісінің қосынды коэффициенті  $\sigma = 30 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , ал қоршаған ортаның температурасы  $T_0 = 293 \text{ К}$ .

## 1.5 Диэлектриктердің тесілуі

Қалыпты атмосфералық қысымда ауаның тесілу кернеуі қалай және неге өзгереді, егер температураны 20 - дан  $100^\circ \text{C}$  дейін көтерсе?

а) Қоршаған ортаға жылудың сейілуі жоқ деп есептеп, қалыңдығы 1 см полиэтилен оқшаулағыштың температурасы қанша өседі, егер ол 30 с ішінде жиілігі 1 МГц кернеуі 10 кВ айнымалы біртекті электр өрісінде болса. Оқшаулағыштың меншікті жылу сыйымдылығы  $c = 2,25 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К); тығыздығы  $d = 940$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon = 2,4$ ;  $tg\delta = 4 \cdot 10^{-4}$ .

б) Қалыңдығы сондай электротехникалық фарфордан жасалған оқшаулағыш үшін осыған ұқсас есеп жасау керек, егер оның жылу сыйымдылығы  $c = 1,1 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К); тығыздығы  $d = 2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon = 7$ ;  $tg\delta = 10^{-2}$ .

Шешуі:

Ауданы  $S$  электродтары арасында орналасқан қалыңдығы  $h$  диэлектрикте сейілетін қуат  $P_a = U^2 \omega C tg\delta = (U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 S t g\delta) / h$ .  $t$  уақытында оқшаулағыш көлемінде бөлінетін жылудың саны  $Q = P_a t$ .

Оқшаулағыштың ауқымын және материалдың меншікті жылу сыйымдылығын біле отыра, температураның өсуін анықтауға болады

$$\Delta T = \frac{Q}{cdV} = \frac{P_a t}{cdSh} = (U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 t g\delta) / cdh^2.$$

а) полиэтилен үшін:

$$\Delta T = \frac{(10^4)^2 \cdot 2\pi \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4 \cdot 30 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{2,25 \cdot 10^3 \cdot 940 \cdot (10^{-2})^2} = 0,76 \text{ K}.$$

б) электротехникалық фарфор үшін:  $\Delta T = 42,4 \text{ K}$ .

## 1.6 Белсенді диэлектриктер

Бөлме температурасында барий титанатының монокристалдарының спонтандық полярлануы  $0,25$  Кл/м<sup>2</sup> тең. Спонтандық полярланудың себебі тек титан ионының қарапайым кубтық ұяшығының ортасынан ығысуы ғана деп есептеп, осы ығысуды анықтау керек. Тордың ұқсастық периоды  $a$   $0,4$  нм тең қабылдансын.

Оциллографтың экранынан алынған гистерезис тұзағының белгілі ауданы бойынша сегнетоэлектриктің диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсын есептеуге мүмкіндік беретін өрнекті шығару керек.

Бетінде тығыздығы  $\sigma = 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup> байланысқан электр зарядтары бар қалыңдығы  $h = 1$  мм электреттің қимасы тұйықталған жалпақ конденсаторға орналастырылған. Ауа саңлауындағы  $E_1$  және электреттің ішіндегі  $E_i$  электр өрісінің кернеулігін анықтау керек, егер саңлаудың ені  $l = 10^{-2}$  мм, ал электреттің диэлектрлік өтімділігі  $\varepsilon = 150$ .

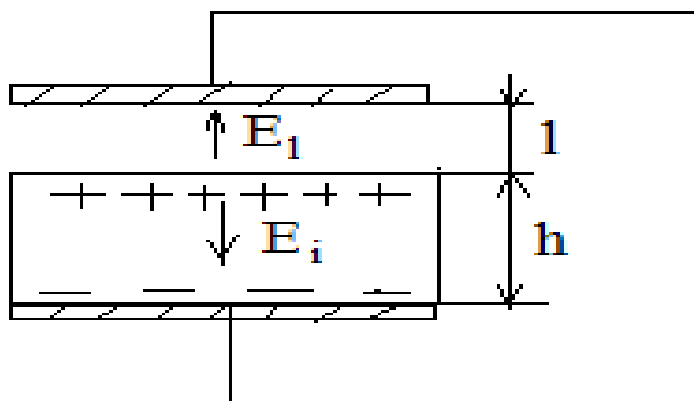
Шешуі:

Остроградский – Гаустың теоремасына сәйкес  $\varepsilon_0 E + \varepsilon \varepsilon_0 E_i = \sigma$ . Жоғарғы және төменгі электродтар арасындағы потенциалдар айырмасы нөлге тең, сондықтан  $E_l - E_h = 0$ . Осы екі теңдеулерден алады:



$$E_i = \frac{\sigma}{\varepsilon_0(1+\varepsilon l/h)} = \frac{10^{-5}}{8,85+10^{-12}(1+150/10^{-3})} = 4,5 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$E_1 = \frac{\sigma l}{\varepsilon_0(1+\frac{\varepsilon l}{h})h} = 4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{10^{-5}}{10^{-3}} = 4,5 \cdot \frac{10^3 \text{В}}{\text{м}}.$$



Жалпақ диэлектриктің электрленуі нәтижесінде байланысқан электр зарядтарының беттік тығыздығы  $\sigma = 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> алынған.  $\sigma$  мәні қалай өзгереді, егер электретті уақытша метал электродтарымен тұйықтаса? Ауаның электрлік беріктілігі  $E_{пр\text{в}} = 3,2$  МВ/м.

Қалыңдығы  $h = 1$  мм пьезоэлектрлік кварцтың X – қиығының қиындысына X өсі бойымен механикалық кернеу  $\sigma_1 = 10^5$  Н/м<sup>2</sup> әсер жасайды. Қиындының қарсы жазықтықтарының арасындағы потенциалдар айырмасын анықтау керек, егер X өсі бағытында бойлық пьезоэффектің пьезомодулі  $d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Кварцтың диэлектрлік өтімділігі 4,6.

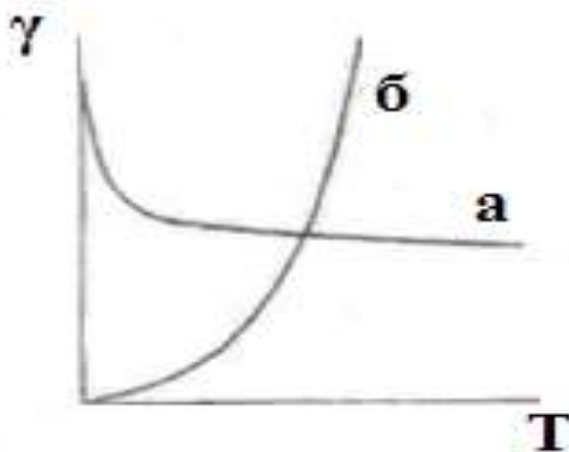
## 2 Жартылай өткізгіш материалдар

Жартылай өткізгіш материалдар олардың өткізгіштігі кернеумен, температурамен, жарықтанумен және басқа нышандармен басқарылатын және өзгерілетін жағдайларда қолданылады. Бұл материалдардан диодтар, транзисторлар, термисторлар, фоторезисторлар және басқа жартылай өткізгіш аспаптар жасалынады.

Жартылай өткізгіштер меншікті кедергісі бойынша, ол бөлме температурасында  $10^{-6} - 10^9$  Ом·м құрайды, металдар мен диэлектриктер арасында аралық жағдайда болады. Жартылай өткізгіштердің меншікті кедергісі көбінесе сыртқы нышандардан, олардың құрамында бар қоспалардың түрінен және санынан тәуелді. Жартылай өткізгіштердің меншікті кедергісінің температуралық коэффициенті теріс таңбалы, яғни меншікті өткізгіштігінің температуралық коэффициенті оң таңбалы.

Германий, кремний, селен, теллур, бор, көміртегі, фосфор, күкірт, сурьма, мышьяк, қалайы, йод, одан басқа бинарлық қосылыстар  $K\text{Sb}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  және басқалар, үш дүркін қосылыстар  $\text{CuSbS}$ ,  $\text{PbBiSe}_2$  және басқалар, қатты ерітінділер  $\text{GeSi}$ ,  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  және басқалар. Органикалық қосылыстар фталоцианин, антрацен  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ , нафталин  $\text{C}_{10}\text{H}_8$  және басқалар.

Көпфазалы жартылай өткізгіштерге жатады: кремний карбиді, керамикалық немесе басқа байланыспен бекітілген графит, немесе тирит, силит және басқалар. Қазіргі уақытта шыны тәрізді және сұйық жартылай өткізгіштер ойластырылып жасалынған.



2.1 сурет - Меншікті өткізгіштігінің температурадан металдар және жартылай өткізгіштер үшін температурадан тәуелділігі

Электрон (e) оқшауланған атомда қатаң анықталған дискреттік энергетикалық деңгейлерде болуы мүмкін. Бұл деңгейлердің атомның ядро ортасынан радиустары Паули шартына сәйкес:

$$2\pi r = n\lambda,$$

одан  $r = n\lambda / 2\pi$ .

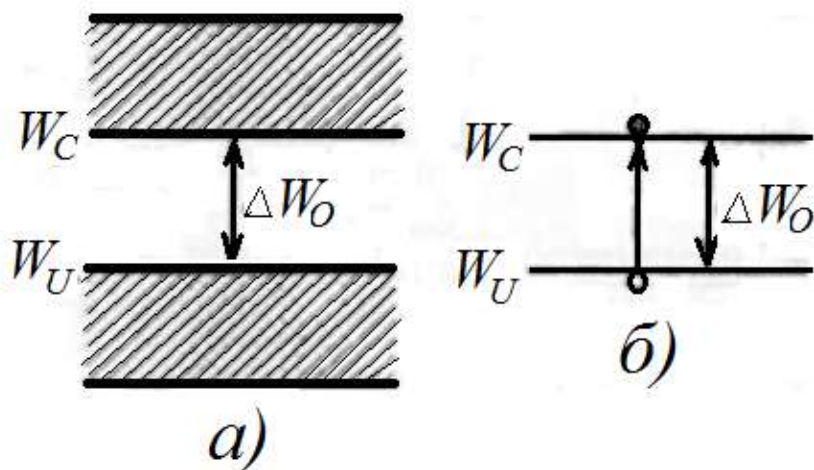
Бұл шарт бойынша электрон жылжитын оның орбитасында толқындардың бүтін саны болу керек;  $n = 1, 2, 3$  – бүтін сандар.

Энергетикалық аймақтар жалпы жағдайда тыйым салынған энергиялардың аралықтарымен бөлінген  $W_i$ , оларды тыйым салынған аймақтар дейді.

Электрондар оқшауланған атомда энергиясы минималды деңгейлерге орналасуға ұмтылады; жоғары энергетикалық деңгейлер бос қалады. Ең жоғарғы толған аймақты валенттік аймақ дейді, ал ең төменгі бос аймақты өткізу аймағы дейді.

Жартылай өткізгіштерге тыйым салынған аймағының ені  $\Delta W_i = 0,05 \dots 3$  эВ заттар, ал диэлектриктерге  $\Delta W_i > 3$  эВ материалдар жатады.

Меншікті (собственный) деп қоспасы жоқ жартылай өткізгіштерді айтады.

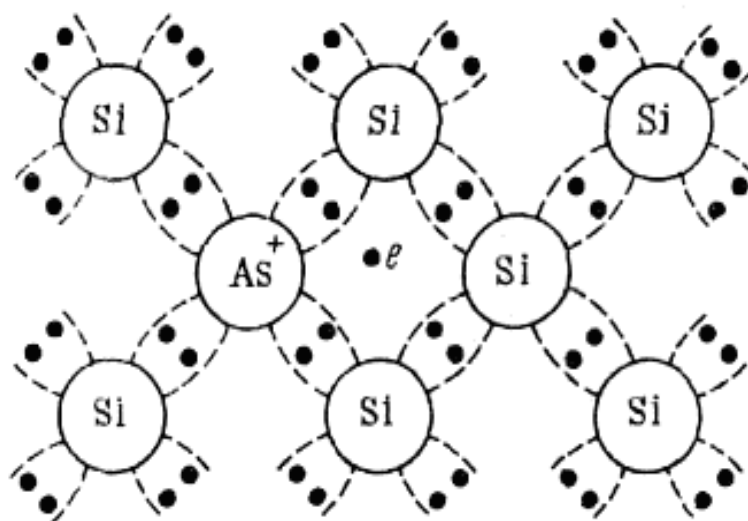


2.2 сурет - Меншікті жартылай өткізгіштің аймақтық диаграммасы

Суретте  $W_c$  – өткізгіштік аймақтың түбі деп аталатын өткізгіштік аймақтың төменгі деңгейі;

$W_v$  – валенттік аймақтың төбесі деп аталатын валенттік аймақтың жоғарғы деңгейі;

$\Delta W_0$  – тыйым салынған аймақтың ені.



2.3 сурет - n – типті жартылай өткізгіштің кристал торының жазық нобайы (моделі) (кремнийге Si мышьяк As қосылған)

Қоспалы деп донорлық немесе акцепторлық қоспалары бар жартылай өткізгіштерді айтады. Егер Si немесе Ge – ға қоспа ретінде Менделеев кестесіндегі 5 валенттік электроны бар V элемент As мышьяқты енгізсе, As бесінші электроны коваленттік байланысқа қатыспайды. Өзінің атомымен ол кулон күшімен байланысады. Бұл байланыстың энергиясы мәнді емес, P, As, Sb үшін ол шамамен  $\Delta W_0 = 0,01$  эВ, Ge –  $0,03$  эВ.

Жақын атомдармен байланысты аяқтауға қажеттен көп валенттік электроны бар қоспаны донорлық дейді, ал мұндай қоспасы бар жартылай өткізгішті электронды электрөткізгіштігі бар жартылай өткізгіш дейді (немесе  $n$  – типті – теріс таңбалы).

Бесінші электрон бос болу үшін коваленттік байланысты үзуге кететіннен аз энергия жұмсалады. Осыған байланысты аймақтық диаграммада бесінші валенттік электронның энергетикалық деңгейі тыйым салынған аймақта өткізу аймағының түбіне жақын болу керек.

Температура өскен сайын электрондар  $W_v$  деңгейлерінен  $W_c$  өткізу аймағына өтеді (1 өтпе). Осымен қабат коваленттік байланыс үзілетін 2 өтпе жүреді, нәтижесінде электрон және кемтік зарядты еркін тасушылардың жұбы пайда болады. Электрондар зарядтың негізгі тасушылары болады, кемтіктер – негізгі емес.

Егер IV топтың жартылай өткізгішіне III топ элементінің қоспасын енгізсе, мысалы алюминий, онда алюминийдің барлық үш валенттік электроны коваленттік байланысқа қатысады. Мұнда негізгі заттың төрт байланысының бірі аяқталмай қалады. Мұндай қоспаны акцепторлық, ал мұндай қоспасы бар жартылай өткізгішті кемтік электрөткізгіштігі бар жартылай өткізгіш дейді. Аяқталмаған байланыс – кемтік тордың жылу тербелістері есебінен кристал аймағында хаос қозғалысын жасайды.

Бос кемтік пайда болу үшін коваленттік байланысты үзетіннен кем энергия  $W$  қажет. Ge ;2yt Si B, Al, Ga, In үшін бұл  $W = 0,010,07$  эВ. Онда, локалды энергетикалық деңгейлер  $W_a$  жартылай өткізгіштің тыйым салынған аймағында валенттік аймақтың төбесіне жақын орналасқан. Температура өскенде валенттік аймақтың электрондары валенттік аймақта кемтіктердің тиісті саны пайда болумен бірге локалды деңгейлерді толтыра береді (өтпе 1).

Сонымен бірге өтпе 2 мүмкін, мұнда еркін тасушылардың жұбы пайда болады: электрон – кемтік.

$p$  – типті жартылай өткізгіште зарядтың негізгі тасушылары кемтіктер, негізгі емес – электрондар.

Сыртқы электр өрісі болғанда жартылай өткізгіштен өтетін токтың тығыздығы:

$$I_n = nev_n,$$

мұнда  $n$  – өткізуші аймақтың электрондарының шоғырлануы;

$e$  – электронның заряды;

$v_n$  – электрондардың жылдамдығы,  $u_n$ ,  $u_p$ .

Электрондардың жылжымалылығын ескергендегі электрондармен байланысты жартылай өткізгіштің меншікті өткізгіштігі:

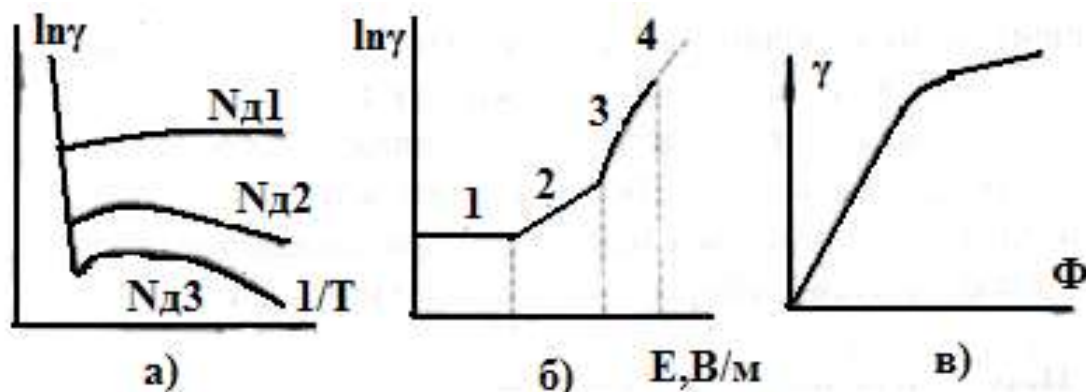
$$\gamma_n = ne u_n.$$

Меншікті жартылай өткізгіш үшін ұқсас кемтік құраушы

$$I_p = p e v_p \quad \text{және} \quad \gamma_p = p e u_p.$$

Жартылай өткізгіштен өтетін токтың толық тығыздығы

$$I = I_n + I_p = (n e u_n + p e u_p) E.$$



а – температурадан; б – әртүрлі температурадағы электр өрісінің кернеулігінен; в - жарықтықтан

2.4 сурет - Жартылай өткізгіштің меншікті өткізгіштігінің тәуелділігі

Ферми деңгейі бұл энергиядан төмен Ферми - Дирак статистикасына бағынатын бөлшектер немесе квазибөлшектер жүйесінің барлық жағдайлары толтырылған, ал одан жоғары – температураның абсолюттік нөлінде негізгі жағдайда бос ( $T = 0 \text{ K}$ ).

## Есептер

### Меншікті және қоспалы жартылай өткізгіштер

Меншікті германийда 300 К Ферми деңгейінің жағдайын табу керек, егер оның тыйым салынған аймағының ені  $\Delta W = 0,665 \text{ эВ}$ , ал валенттік аймақтың кемтіктері және өткізгіш аймағы электрондары үшін жағдайлар тығыздығының эффективтік массалары сәйкес тең:  $m_v = 0,338 m_0$ ;  $m_c = 0,55 m_0$ , мұнда  $m_0$  – еркін электронның массасы.

Шешуі:

Ферми деңгейінің жағдайы меншікті жартылай өткізгіште өрнекпен анықталады:

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = W_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c},$$

мұнда  $W_i$  – тыйым салынған аймақтың ортасына сәйкес деңгей;

$$N_v = \frac{2(2\pi m_v kT)^{3/2}}{h^3}; N_c = \frac{2(2\pi m_c kT)^{3/2}}{h^3}.$$

Валенттік аймақтың кемтіктері және өткізгіш аймақтың электрондары үшін жағдайлардың сәйкес эффективтік тығыздығы. Бұл жағдайда

$$N_v = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,388 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-31})^3} = 6,04 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3},$$

$$N_c = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,55 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 1,02 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Сонымен,

$$W_F - W_i = \frac{8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300}{2} \ln \frac{6,04 \cdot 10^{24}}{1,02 \cdot 10^{23}} = -6,78 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

немесе

$$W_F - W_v = W_i - W_v + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{\Delta W}{2} + kT \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{0,665}{2} - 6,78 \cdot 10^{-3} = 0,326 \text{ эВ},$$

яғни Ферми деңгейі меншікті германийде бөлме температурасында тыйым салынған аймақтың ортасынан 6,78 мЭВ төмен, бірақ валенттік аймақтың төбесінен 326 мЭВ жоғары орналасқан. Есептің нәтижелері көрсеткендей, температура өскен сайын Ферми деңгейі жағдайлардың тығыздығы аз аймаққа жақындайды және сондықтан тезірек толады.

Кремнийдегі заряд тасушыларының меншікті концентрациясын  $T = 300$  К есептеу керек, егер оның тыйым салынған аймағының ені  $\Delta W = 1,12$  эВ, ал жағдайлар тығыздығының эффективтік массалары  $m_v = 0,56m_0$ ;  $m_c = 1,05m_0$ .

Индий арсенидінің кристалына күкірт ендірілген, мұнда донорлардың артық шоғырлануы  $N_d - N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ .  $T = 300^\circ\text{C}$  температурасында осы жартылай өткізгіштің электр параметрлері меншікті индий арсенидінің параметрлеріне жақын деп есептеуге бола ма, егер электрондар үшін жағдайлар тығыздығының эффективтік массалары  $m_c = 0,023 m_0$ ,  $m_v = 0,43 m_0$ , ал InAs тыйым салынған аймағының ені (эВ) температурамен  $0,462 - 3,5 \cdot 10^{-4} T$  заңымен өзгереді.

Ферми деңгейінің жағдайын  $T = 300$  К температурасында мышьяқтың  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомы және галлийдің  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомы бар германийдің кристалдарында санау керек.

## 2.1 Жартылай өткізгіштердің электрөткізгіштігі

Жартылай өткізгіштен өтетін толық токтың кемтік құраушысымен туындайтын токқа қатынасын есептеу керек: а) меншікті германийда; б)

меншікті кедергісі  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $p$  – типті германийда. Бөлме температурасында заряд тасушылардың меншікті шоғырлануын  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , электрондардың жылжымалылығын  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , кемтіктердің жылжымалылығын  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  қабылдау керек.

Шешуі:

Ом заңының негізінде толық токтың оның кемтік құраушысына қатынасы үшін өрнекті алады:

$$\beta_p = \frac{I}{I_p} = \frac{e(n\mu_n + p\mu_p)}{ep\mu_p} = 1 + \frac{n\mu_n}{p\mu_p},$$

мұнда  $n$  және  $p$  – электрондар мен кемтіктердің шоғырланулары. Меншікті жартылай өткізгіште  $n_i = p_i$  және онда

$$\beta_i = 1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} = 1 + \frac{0,39}{0,19} = 3,05.$$

Өзіндік кедергісі меншіктіден көп аз  $p$  – типті жартылай өткізгіште электрондардың электрөткізгіштігіне қосатын үлесін ескермеуге болады. Осыны ескеріп, зарядтың негізгі тасушыларының  $p \approx (e\mu_p\rho)^{-1} = 6,58 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  және зарядтың негізгі емес тасушыларының шоғырлануын  $n = n_i^2/p = 6,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  алады.

Электрондардың шоғырлануын біле отыра, толық токтың кемтік құраушысына қатынасын дәлірек анықтауға болады

$$\beta_i = 1 + \frac{6,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,39}{6,58 \cdot 10^{20} \cdot 0,19} = 1,002.$$

$n$  – типті кремний үлгісінің  $T_1 = 300 \text{ К}$  температурасында меншікті кедергісі  $\rho = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , мұнда электрондардың шоғырлануы температура  $T_2 = 500 \text{ К}$  дейін қыздырғанша өзгермейді. Осы температуралық аралықта зарядтың негізгі емес тасушыларының шоғырлануы қанша өзгертінін анықтау керек.  $T_1$  температурасында электрондардың жылжымалылығы  $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Зарядтың меншікті шоғырлануы  $n_i \approx 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ . Тыйым салынған аймақтың енінің температуралық өзгеру коэффициенті  $b = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ .

$300 \text{ К}$  температурасында меншікті кедергісі  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $p$  – типті германийда электрондар мен кемтіктердің шоғырлануын есептеу керек. Жетіспейтін мәліметтерді 3.2.6 есебінен алу керек.

Қоспалардың қандай шоғырланғанында германийдің меншікті өткізгіштіктігінің мәні  $300 \text{ К}$  температурасында ең аз екенін анықтау керек. Сол температурада өзіндік меншікті өткізгіштіктің минималдыға қатынасын табу керек. Шығару үшін мәліметтерді 3.2.6 есебінен алу керек.

Температура 20 - дан 21°C дейін өзгергенде меншікті электрөткізгіштіктігі бар индий антимионидінің өзіндік өткізгіштіктігі қанша көбейеді, егер тыйым салынған аймақтың ені  $\Delta W = 0,172$  эВ, ал электрондар мен кемтіктердің жылжымалылығы  $T^{-3/2}$  заңымен өзгереді. Тыйым салынған аймақ енінің температуралық өзгеру коэффициенті  $b = -2,8 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

## 2.2 Гальваномагниттік және жылуэлектрлік құбылыстар

Донорлардың концентрациясы  $N_d = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$   $T_1 = 20$  К температурада n – типті кремнийде Холл коэффициенті  $R_{H1} = 428 \text{ м}^3/\text{Кл}$ , ал  $T_2 = 40$  К температурасында  $R_H = 0,21 \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Донорлардың иондалу энергиясын анықтау керек.

Шешуі:

$T = 40$  К температурасында заряд тасушылардың шоғырлануы:

$$n = (R_{He})^{-1} = (0,21 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{-1} = 2,98 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

n «  $N_d$  болғасын, формуланы пайдалануға болады:

$$n = \sqrt{N_c N_d} \exp \left[ \frac{\Delta W_d}{2kT} \right].$$

Онда Холл коэффициенті:

$$R_H = \frac{1}{ne} = \frac{\exp \left[ -\frac{\Delta W_d}{2kT} \right]}{e \sqrt{N_c N_d}}.$$

$N_c \sim T^{3/2}$  ескеріп, қатынасқа келеді:

$$\ln \frac{R_{H2} T_2^{3/4}}{R_{H1} T_1^{3/4}} = \frac{\Delta W_d}{2k} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

Осыдан донорлардың иондалу энергиясын табады:

$$\Delta W_d = \frac{2k \ln \left[ \frac{R_{H2} T_2^{3/4}}{R_{H1} T_1^{3/4}} \right]}{\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = \frac{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \ln \left[ 0,21 \cdot \frac{40^4}{428} \cdot 20^{3/4} \right]}{\frac{1}{40} - 1/20} = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}.$$

Меншікті германий үлгісі ұштарының арасында оны бірқалыпты қыздырғанда қандай потенциалдар айырмасы пайда болады, егер үлгі бойындағы температура айырмасы  $\Delta T = 10$  К, ал суықтау ұштың температурасы 500 К тең болса? Оның тыйым салынған аймағының ені  $\Delta W = 0,665$  эВ, ал валенттік аймақтың кемтіктері және өткізгіш аймағы



электрондары үшін жағдайлар тығыздығының эффективтік массалары сәйкес тең:  $m_v = 0,338m_0$ ;  $m_c = 0,55m_0$ , мұнда  $m_0$  – еркін электронның массасы. Заряд тасушылары жылжымалықтарының қатынасын  $\frac{\mu_n}{\mu_p}$  екіге тең деп алынсын.

300 К температурасында фосфор шоғырлануы  $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$  n – типті кремний үшін дифференциалдық термоЭҚК есептеу керек. ТермоЭҚК шамасы қанша өзгереді, егер жартылай өткізгіштің температурасын 400 К дейін көтерсе.

### 2.3 Жартылай өткізгіштердегі түйіспелік және беттік құбылыстар

Германийлық p – n өтпесінің p – аймағының меншікті кедергісі  $\rho_p = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , ал n – аймағының меншікті кедергісі  $\rho_n = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . p – n өтпесінің T = 300 К температурасындағы потенциалдық бөгетінің биіктігін есептеу керек.

Шешуі:

Жартылай өткізгіштің p – аймағының меншікті кедергісі  $\rho_p \approx 1/(N_a e \mu_p)$ , мұнда  $\mu_p$  – кемтіктердің жылжымалылығы. Осыдан, қосымша 3 пайдаланып, p – аймағындағы акцепторлардың шоғырлануын табады:

$$N_a = 1/\rho_p e \mu_p = 1/2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900 = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Осыған ұқсас жартылай өткізгіштің n – аймағындағы донорлардың шоғырлануын табады:

$$N_d = 1/\rho_n e \mu_n = 1/1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Қоспаларды иондалған деп есептеп, p – n өтпесінің потенциалдық бөгетінің биіктігін табады:

$$e\phi_k = kT \ln(N_a N_d/n_i^2).$$

$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  қабылдап, табады:

$$e\phi_k = 8,62 \cdot 10^{-5} \ln \frac{1,65 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} = 0,215 \text{ эВ}.$$

Қоспаларының шоғырлануы  $N_d = 10^3 N_a$  германиялық p – n өтпесі бар, мұнда германийдің  $10^8$  атомының әрқайсысына акцепторлық қоспаның бір атомы келеді. T = 300 К температурасындағы потенциалдардың түйіспелік айырмашылығын анықтау керек. Германий атомдарының N және иондалған атомдардың  $n_i$  шоғырлануларын  $4,4 \cdot 10^{22}$  және  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  сәйкес қабылдау керек.

Германийлық р – n өтпесі бар құрылымда р - аймағының меншікті өткізгіштіктігі  $\gamma_p = 10^4$  См/м және n – аймағының меншікті өткізгіштіктігі  $\gamma_n = 10^2$  См/м. Электрондардың  $\mu_n$  және кемтіктердің  $\mu_p$  германийдағы жылжымалықтары сәйкес 0,39 және 0,19 м<sup>2</sup>/(В·с) тең. T = 300 К температурасында өтпедегі потенциалдардың түйіспелік айырмасын есептеу керек, егер меншікті шоғырлану  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup> болса.

Германийлық р – n өтпесінің қанығуының кері тогы 1 мкА, ал сол мөлшердегі кремний өтпесі қанығуының кері тогы  $10^{-8}$ . T = 293 К және 100 мА токта өтпелердегі  $U_{пр}$  тура кернеулерді есептеп, салыстыру керек.

Бөлме температурасында р – n өтпесі қанығуының кері тогы  $I_0 = 10^{-14}$  А. Температураны 125°С дейін көтергенде қанығудың кері тогы  $10^5$  есе көбейді. Бөлме және 125°С температурасында өтпедегі кернеуді анықтау керек, егер одан өтетін тура ток I = 1 мА болса.

### 3 Өткізгіш материалдар

Өткізгіш материалдар бұл электр тогын жеңіл өткізетін заттар. Қатты және сұйық заттар өткізгіш материал бола алады. Қатты өткізгіштерге металдар және олардың қорытпалары, сұйықтарға металдардың ерітінділері, электролиттер жатады, сынап – 20°С температурасында сұйық жағдайда болатын жалғыз метал. Газдар плазма болатын ерекше иондалған жағдайда ( $10^4$  градус температурада) өткізгіш болады.

Қатты өткізгіштердің және сұйық металдардың электрондық өткізгіштіктері, сұйық ерітінділердің иондық өткізгіштіктері бар; газдар және металдардың булары қалыпты жағдайда диэлектрик болады.

Электрондық өткізгіштіктері бар қатты өткізгіштер бірінші тектің өткізгіштері; иондық өткізгіштіктері бар сұйық ерітінділер екінші тектің өткізгіштері болады. Екінші тектің өткізгіштері немесе электролиттер бұл су ерітінділері және тұз, қышқыл, сілте және молекулаларының иондық құрылысы бар басқа заттардың ерітінділері. Электролиттерден токтың өтуі электролиз құбылысымен байланысты; мұнда электр зарядтары электролит молекулалары бөлшектерімен (иондармен) бірге көшеді, электродтарда Фарадей заңына сәйкес электролиз өнімдері бөлінеді, ал электролиттің құрамы өзгереді. Электронды өткізгіштігі бар металдарда олардан ток өткенде металдың массасы және химиялық құрамы өзгермейді.

Электротехникадағы маңызды қатты өткізгіш материалдар болатын металдар және олардың қорытпалары.

Өткізгіш материалдар электрөткізгіш шамасы және арналымы бойынша жіктеледі:

1) Өткізгіштіктері жоғары өткізгіштер электрэнергияны мүмкін аз шығындармен үлкен қашықтықтарға жеткізуге арналған.

2) Меншікті өткізгіштіктері жоғары өткізгіштер электрэнергияны жылуға түрлендіруге арналған (электр пештері); реостаттарда, потенциометрлерде және басқаларда жұмыс кернеуін төмендету.

3) Сымсыз өткізгіштер, негізінде электр көмірлері және ұнтақтары.

4) Жоғарыомды үлпек және композициялық материалдар электро – радиотехникадағы резисторлар үшін.

5) Электротехникада пайдаланатын әртүрлі металдар. Электр сұлбаларын дәнекерлейтіндер және флюстер.

Металдардың электрондық теориясына сәйкес қатты өткізгіштердің кристал торы бар. Кристал тордың түйіндерінде металдың оң таңбалы иондары, кристалдың ішінде металдың әр атомынан бір немесе екі еркін электронынан тұратын «электрон газы» бар.

### 3.1 Өткізгіштердің негізгі электрлік және физикалық қасиеттері және оларға сыртқы нышандардың әсері

1. Меншікті өткізгіштік немесе кері шама – меншікті кедергі ( $\gamma$  және  $\rho$ ).

2. Меншікті кедергінің температуралық коэффициенті ( $T_{кр}$ ).

3. Меншікті жылу өткізгіштігі ( $\gamma_T$ ).

4. Потенциалдардың түйіспелік айырмашылығы және термоэлектрқозғаушы күш (термоЭ.Қ.К.).

5. Созылғандағы беріктіліктің шегі және үзгендегі салыстырмалы ұзару ( $\sigma_{рас}$   $\sigma_{сж}$ ).

### 3.2 Өткізгіштердің меншікті кедергісі

Өткізгіштегі токтың күші:

$$I = Nsv_3e, \quad (3.1)$$

мұнда  $N$  –  $см^{-3}$  көлемнің бірлігіндегі зарядтың еркін тасушыларының саны;

$S$  – өткізгіштің қимасы  $см^2$ ;

$v_3$  – кернеулігі  $E$  өрісі әсерінен электрондардың дрейф жылдамдығы;

$e$  – электронның заряды  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кул.

Электрондардың жылжымалылығын енгізіп, Ом заңының өрнегін алады:

$$I = NseuE; \quad (3.2)$$

$$j = NeuE; \quad j = \gamma E. \quad (3.3)$$

Меншікті өткізгіштікке  $\gamma$  кері шама меншікті кедергі деп аталады  $\rho$ . Қимасы тұрақты  $s$ , ұзындығы 1 өткізгіш үшін  $\rho$  есептеледі:

$$\rho = Rs/1. \quad (3.4)$$

### 3.3 Меншікті кедергінің температуралық коэффициенті – $T_{kp}$

Меншікті кедергінің орташа температуралық коэффициенті:

$$T_{kp} = \alpha_p = \rho_t - \rho_o / \rho_o \Delta t.$$

$t$  температурасында  $\alpha_p$  үшін дифференциалдық өрнек:

$$\alpha_{p,t} = 1/ \rho_t \cdot d\rho/dt, [\text{град}^{-1}].$$

ТермоЭ.Қ.К. Екі метал түйіскенде олардың арасында потенциалдар айырмасы пайда болады. Потенциалдар түйіспелік айырмасының себебі электрондардың металдардан шығу жұмысының әртүрлі мәндерінде және әртүрлі металдар мен қоспалардың еркін электрондарының метал көлемінің бірлігінде әртүрлі болуында:

$$U = K/e(T_1 - T_2) \ln(n_{OA}/n_{OB}) = A(T_1 - T_2)$$

ТермоЭ.Қ.К.  $(T_1 - T_2)$  функциясы.

### 3.4 Өткізгіш материалдардың негізгі қасиеттері

Жіктелуі. Өткізгіш материалдар ретінде қатты денелер, сұйықтар және газдар (иондалған жағдайда) қолданылады. Әдетте электротехникада қолданылатын қатты өткізгіш материалдар – металдар мен олардың қорытпалары. Металл өткізгіш материалдар мынадай топтарға бөлінеді:

а) өткізгіштегі жоғары металдар (қалыпты температура кезінде меншікті кедергілерді  $\rho \leq 0,5 \text{ мкОмм}$ );

б) кедергілері жоғары қорытпалар ( $\rho \geq 0,05 \text{ мкОмм}$ );

в) өте төмен (криогендік) температура кезінде меншікті кедергілері тым болатын материалдар – асқын өткізгіштер және криогендік өткізгіштер.

Сұйық өткізгіштерге балқыған күйіндегі металдар және әртүрлі электролиттер жатады. Көпшілік металдардың балқу температурасы жоғары болады, тек сынаптың температурасы –  $30^0 \text{ С}$  тең, сол себептен сынап қалыпты температура кезінде сұйық метал өткізгіш ретінде қолданылады.

Қатты және сұйық металдар арқылы электр тоғының өтуін электр өрісінің әсерінен еркін электрондардың қозғалуы себеп болады, сондықтан металдар электрондық электр өткізгіштігі бар өткізгіштер немесе бірінші текті өткізгіштер деп аталады. Екінші текті өткізгіштерге қышқылдардың, сілтілердің және тұздардың ерітінділері жатады. Еріген күйдегі иондық кристалдар да осы өткізгіштер түріне жатады.

Егер де электр өрісінің кернеулігі соққылық иондалу мен фотоиондалуды қамтамасыз ететін белгілі аумалы мәннен артық болса, онда

газ электрондық және иондық электр өткізгіштігі бар өткізгішке айналуы мүмкін.

Материалдардың қасиеттері. Өткізгіш материалдардың қасиеттерін сипаттайтын маңызды параметрлеріне мыналар жатады:

1) Өткізгіштердің меншікті өткізгіштігі және меншікті кедергісі.

Тоқтың тығыздығы  $J$  мен электр өрісінің кернеулігі  $E$  арасындағы өзара байланыс былай анықталады:

$$J = \gamma E, \quad (3.5)$$

мұндағы  $\gamma$  - өткізгіш материалдардың өткізгіштігі, См/м.

Меншікті өткізгішке кері шама  $\rho = 1/\gamma$  - өткізгіш материалдардың кедергісі деп аталады, Ом·м. Меншікті кедергімен өткізгіш кедергісі арасындағы қатынас:

$$\rho = R \cdot S / l, \quad (3.6)$$

мұндағы  $l$  - өткізгіштің ұзындығы, м;

$S$  - өткізгіштің көлденең қимасы, мм<sup>2</sup>.

Меншікті кедергінің әртүрлі өлшем бірлігінің арасындағы байланыстар:

$$\text{Ом.м} = 10^6 \text{ мкОм.м} = 10^6 \text{ Ом.м} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}. \quad (3.7)$$

Металдардың классикалық теориясы бойынша метал өткізгіштердің меншікті өткізгіштігі:

$$\gamma = (e^2 n_0 \lambda) / (2m v_t), \quad (3.8)$$

мұндағы  $e$  – электрон заряды;

$n_0$  – метал көлемінің бірлігіндегі еркін электрондардың саны;

$\lambda$  - электронның еркін өту жолының орташа ұзындығы;

$m$  – электронның массасы;

$v_t$  – метал ішіндегі электрондардың жылулық қозғалысының орташа жылдамдығы.

2) Металдардың меншікті кедергілерінің температуралық коэффициенті.

Метал өткізгіштің ішіндегі еркін электрондардың шоғырлығы температураға тәуелді болмайды. Бірақ, температурасы өсу арқасында еркін өту жолының орташа ұзындығы  $\lambda$  және электрондардың құндылықтары азаяды, сол себептен металдардың меншікті өткізгіштері де азаяды және меншікті кедергілері өседі, яғни металдардың меншікті кедергілерінің температуралық коэффициенті температураға тәуелділігі былай өрнектеледі

$$\alpha_p = 1/\rho_0 d\rho/dT. \quad (3.9)$$

Температураға өз ауқымында өзгерген жағдайда меншікті кедергіні былай анықтайды:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_\rho (T_2 - T_1)], \quad (3.10)$$

мұндағы  $\rho_1$  және  $\rho_2$  - өткізгіш материалдардың  $T_1$  және  $T_2$  температуралары кезіндегі сәйкес меншікті өткізгіштері ( $T_1 > T_2$  деп алынады);

$\alpha_\rho$  – материалдардың  $T_1$  және  $T_2$  дейінгі температуралық ауқымдағы меншікті өткізгіштігінің орташа температуралық коэффициенті.

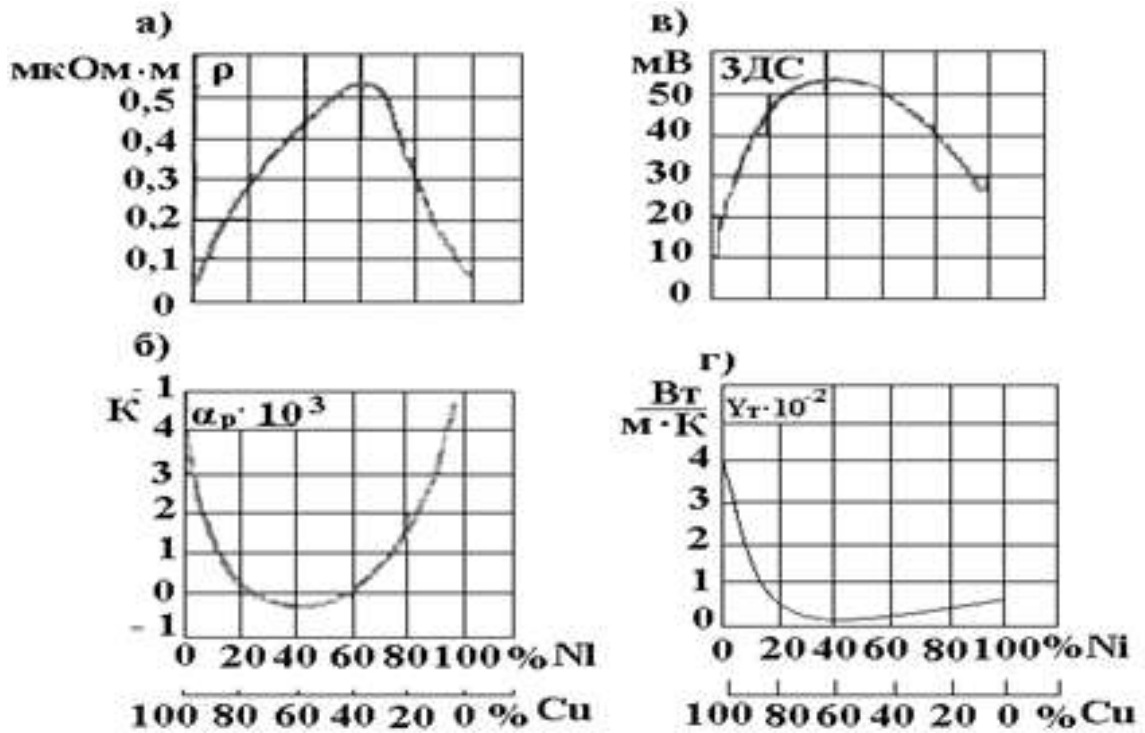
3) Қорытпалардың меншікті кедергісі. Қоспалар және металдардың дұрыс құрылысы олардың меншікті кедергісін арттырады. Екі метал ерітіліп, қорытылса және бір – бірімен қатты ерітінді түзсе, онда меншікті  $\rho$  едәуір өседі. 3.1 суретінде бір – бірімен қатты ерітінді құрған екі металдан құралған (мыс – никель) қоспаның меншікті кедергісінің, температуралық коэффициентінің, жылулық ЭҚК және жылу өткізгіштік коэффициентінің қоспаның құрамынан тәуелділіктері (масса бойынша пайыз есебінде) көрсетілген.

Егер де екі металдың қорытпасы жеке – жеке бөлек кристалданса және қатып қалған қорытпаның әрбір сыңарының кристал қоспасы болса (металдар қатты ерітіндіні құрамаса), онда қорытпаның меншікті өткізгіштігінің ( $\gamma$ ) қорытпаның құрамына тәуелділігі сызықты өзгереді (3.2 сурет).

4) Металдардың жылу өткізгіштігі. Метал арқылы жылудың берілуіне де еркін электрондар себеп болады. Олардың метал көлемінің бірлігіндегі саны өте үлкен, сол себептен металдардың электр өткізгіштігі жоғары болып келеді. Металдардың жылу өткізгіштік коэффициенті диэлектриктің жылу өткізгіштік коэффициентінен едәуір үлкен болады. Температура өскен кезде метал ішіндегі электрондардың құндылығы және оған сәйкес меншікті өткізгіштігі төмендейді, ал металдың жылу өткізгіштік коэффициентінің оның меншікті өткізгіштігіне қатынасы өседі. Бұл қатынастың шамасы Видеман – Франц – Лоренц заңымен анықталады:

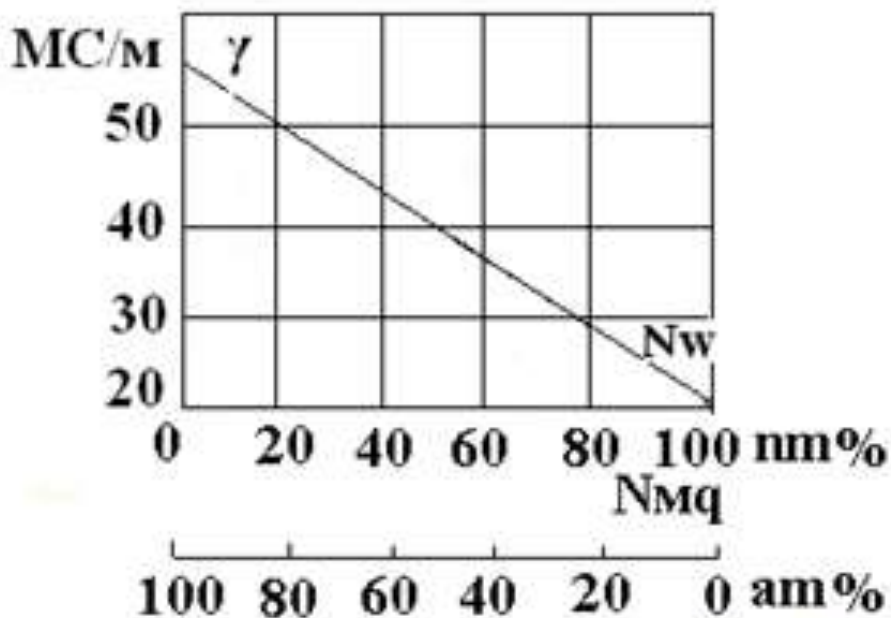
$$\gamma_T / \gamma = L_0 T, \quad (3.11)$$

мұндағы  $T$  – термодинамикалық температура, К;  $L_0$  – Лоренц заңы (3.11) теңдеуін Больцман тұрақтысының мәнін  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к және электрон зарядының мәнін  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл қойып,  $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup> екендігін анықтауға болады.



а – меншікті кедергі  $\rho$ ; б – температуралық коэффициент  $\lambda$ ; в – жылулық ЭҚК;  
 2 – жылу өткізгіштік коэффициенті  $\gamma_r$ .

3.1 сурет - Мыс – никель қорытпалары параметрлерінің олардың құрамынан (масса бойынша пайыз есебінде) тәуелділіктері



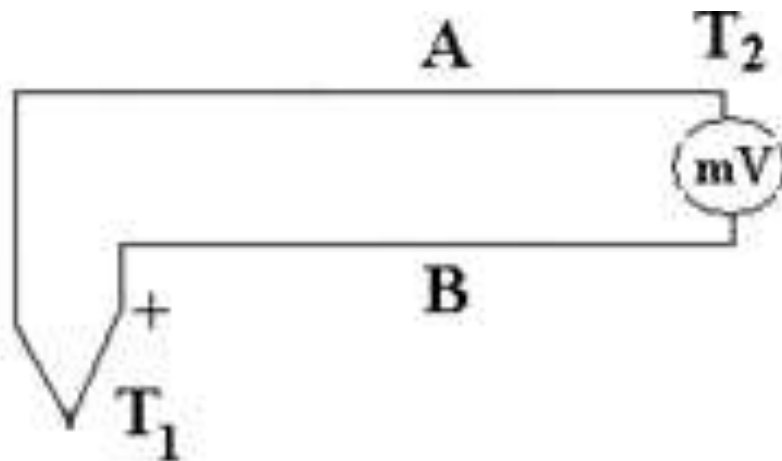
3.2 сурет - Мыс – вольфрам қорытпасының меншікті өткізгіштігінің оның құрамынан тәуелділігі

$$L_0 = \pi^2 \kappa^2 / 3e^2. \quad (3.12)$$

5) Жылулық электр қозғаушы күш. Екі әртүрлі металл өткізгіш бір – бірімен түйіскенде олардың арасында потенциалдардың айырымы пайда болады. Бұл потенциалдар айырымы болу себебі әр түрлі металдардан электрондар шығу жұмысының әртүрлі болуында және электрондар шоғырлығының әртүрлі металдарда және қорытпаларда бірдей еместігінде. Металдардың электрондық теориясының негізінде А және В металдары арасындағы потенциалдардың түйіспелік айырымы мынаған тең:

$$U_{AB} = U_B - U_A + (\kappa T / e) \ln(n_{0A} / n_{0B}), \quad (3.13)$$

мұндағы  $U_A$  және  $U_B$  – түйіскен металдардың потенциалдары;  $n_{0A}$   $n_{0B}$  металдарындағы электрондардың шоғырлығы.



Екі түрлі металдың бір – бірімен қосылған (әдетте балқытып біріктірілген) ұштарындағы температура  $T_1$ , ал екінші ашық ұштарындағы  $T_2$  болса (3.3 сурет) (терможұп сұлбасы), онда бұл тізбек мынаған тең, жылулық ЭҚК пайда болады.

$$\begin{aligned} U &= U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + (\kappa T_1 / e) \ln(n_{0A} / n_{0B}) + U_A - U_B + (\kappa T_2 / e) \ln(n_{0B} / n_{0A}) \\ &= (\kappa / e) (T_1 - T_2) \ln(n_{0A} / n_{0B}), \end{aligned} \quad (3.14)$$

немесе оны мына түрде жазуға болады:

$$U = \Psi(T_1 - T_2), \quad (3.15)$$

мұндағы  $\Psi$  - берілген жұп өткізгіштердің жылулық ЭҚК коэффициенті.

Бір – бірімен оқшауланған әр металдардан немесе қоспалардан бір ұшы біріктіріліп құрастырылған екі сымды өткізгіштен құралған құрылғыны (терможұпты) температураны өлшеуде қолданылады.



## Есептер

### Металдардағы электрондардың статистикасы

Қарапайым кубтық кристал торы бар металда  $T \approx 0$  К температурасында еркін электрондар үшін де Бройль толқынының минималды ұзындығын анықтау керек, егер кристалдың әр атомына бір еркін электрон келсе. Тордың периоды  $a$  тең.

Көлемі  $V = 1 \text{ см}^3$  күміс кристалында өткізгіш аймағының рұқсат етілген деңгейлерінің арасындағы орташа энергетикалық қашықтық  $\delta W$  бағалау керек, егер Ферми энергиясы  $W_F = 5,5$  эВ болса.

Шешуі:

Рұқсат етілген деңгейлердің арасындағы орташа энергетикалық қашықтық  $\delta W = W_F/N$ , мұнда  $N$  – электрондармен толтырылған деңгейлердің саны.

Электрондардың шоғырлануы Ферми энергиясымен өрнекпен байланысты

$$n = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m_0}{h^2}\right)^{3/2} W^{3/2}.$$

$W_F$  Ферми деңгейінен төмен жатқан барлық деңгейлер іс жүзінде толық электрондармен толтырылған, мұнда Паули қағидасына сәйкес әр деңгейде екі электрон бар. Осыдан

$$\begin{aligned} \delta W &= \frac{W_F}{nV/2} = \frac{4\pi}{3V} \left(\frac{2m_0}{h^2}\right)^{3/2} W_F^{1/2} = \\ &= \frac{4 \cdot 3,14 (2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31})^{3/2} (5,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{1/2}}{3(6,62 \cdot 10^{-34})^3 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^{-41} \text{ Дж} = 1,89 \cdot 10^{-22} \text{ эВ}. \end{aligned}$$

### 3.5 Метал және қорытпалардың электрөткізгіштігі

$T = 300$  К мыстағы электрондардың еркін жолының (пробег) ұзындығын есептеу керек, егер бұл температурада оның меншікті кедергісі  $0,017$  мкОм/м тең болса.

Шешуі:

Квант теориясының тұжырымдарына қарағанда металдардың меншікті кедергісі  $1$  электрондардың еркін жолының ұзындығымен қатынаспен байланысты:

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/3} \frac{h}{e^2 n^{2/3} l}.$$

Мыстағы еркін электрондардың шоғырлануы:

$$n = d \frac{N_0}{A} = \frac{8920 \cdot 6,02 \cdot 10^{25}}{63,54 \cdot 10^{-3}} 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Осыдан электрондардың еркін жолының ұзындығы анықталады:

$$l = \left(\frac{3}{8 \cdot 3,14}\right)^{1/3} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 (8,45 \cdot 10^{28})^{2/3} 0,017 \cdot 10^{-6}} 3,89 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

Электронның мыс сымымен 1 км қашықтыққа жүретін уақытын анықтау керек, егер мыстың меншікті кедергісі  $0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ , ал өткізгіш ұштарындағы потенциалдар айырмасы  $U = 220 \text{ В}$ . Электрон осы потенциалдар айырмасында соқтығыспай қанша уақытта өтеді? Сигналды жеткізу уақыты қанша?

### 3.6 Түйіспелік құбылыстары және термоЭҚК

Біреуі алюминийден, екіншісі платинадан жасалған жазық конденсатордың қиындылары арасындағы саңлауда пайда болатын электр өрісінің кернеулігін анықтау керек. Қиындылар өзара мыс сымымен жалғанған, ал саңлаудың ұзындығы  $l = 5 \text{ мм}$ . Электрондардың алюминийден, мыстан және платинадан шығу жұмысы сәйкес құрайды  $4,25$ ,  $4,4$  және  $5,32 \text{ эВ}$ . Өрістің кернеулігі қалай өзгереді, егер алюминий және мыс қиындыларын саңлаудың сол ұзындығында платина сымымен түйіктаса?

Шешуі:

Тізбектелген әртекті тізбектің ұштарындағы потенциалдар айырмасы шеткі өткізгіштерден электрондардың шығу жұмыстарындағы айырмашылықпен анықталады және аралық буындардың саны және құрамынан тәуелді емес. Сондықтан бірінші жағдайда

$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{pt}}{el} = \frac{4,25 - 5,32}{5 \cdot 10^{-3}} = -214 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

екіншіде

$$E_2 = \frac{A_{Al} - A_{Cu}}{el} = \frac{4,25 - 4,4}{5 \cdot 10^{-3}} = -30 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Еркін электрондар концентрациясы  $n = 6 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  метал үшін  $T = 300 \text{ К}$  температурасында абсолюттік меншікті термоэқк мәнін бағалау керек.

### 3.7 Метал және қорытпаларды қолдану

Электр шамының вольфрам қылының кедергісі  $20^{\circ}\text{C}$  35 Ом тең. Шам қылының температурасын анықтау керек, егер оны кернеуі 220 В торапқа қосқанда орныққан режимде қылдан 0,6 А ток өтетіні белгілі.  $20^{\circ}\text{C}$  – да вольфрамның меншікті кедергісінің температуралық коэффициентін  $5 \cdot \text{K}^{-1}$  қабылдауға болады.

Шешуі:

Метал өткізгіші кедергісінің температурадан сызықты тәуелділігін ескеріп алады

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_R(T_2 - T_1)],$$

мұнда  $R_1, R_2 - T_1$  және  $T_2$  бөлме температураларындағы кедергілер. Вольфрам үшін санауға болады  $\alpha_R \approx \alpha_{\rho}$ . Шам қылының жұмыс режиміндегі кедергісі

$$R_2 = \frac{U}{I} = \frac{200}{0,6} = 366,7 \text{ Ом.}$$

Онда

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (R_2 - R_1) / (R_1 \alpha_R) = (366,7 - 35) / (35 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 1895 \text{ K.}$$

Ақырында алады

$$T_2 = 1895 + 293 = 2188 \text{ K.}$$

$f = 10$  МГц жиілігінде диаметрі  $d = 1$  мм қимасы жұмыр мыс сымның кедергісі  $R_{\sim}$  неше есе осы сымның  $R_0$  тұрақты электр тогына жасайтын кедергісінен артық екенін есептеу керек.

## 4 Магниттік материалдар

### Магниттік материалдардың жалпы қасиеттері

Магниттік материалдар олардың көмегімен электрэнергияны өндіргенде, төменгі кернеу токтарын жоғары кернеу токтарына және керісінше трансформациялағанда, электрэнергиясын механикалыққа түрлендіргенде пайдаланылатын магнит ағынын күрт күшейтуге және т.б. қажет.

Егер магниттік материалдар болмаса, қазір қолданатын магнит ағынының мәндерімен тұрақты токтың және төменгі жиіліктің электротехника машиналары және аппараттарының осы кезде бар түрлерін жасау үшін осы құрылғылардың тармақтар саны мен ауқымдарын техникалық мүмкін емес шамаларға дейін көбейту керек болар еді.

Магниттік ағынды, орамнан  $I$  тогын жіберіп, магниттік материал жоқ кезде де жасауға болады. Егер орам тармағының алатын қимасы  $S$ , ал ұзындығы  $L$  болса, магнит ағыны тең болады:

$$\Phi = \frac{\mu_0 n I S}{L},$$

СИ жүйесінде өлшенеді:  $S$  (м<sup>2</sup>),  $L$  (м),  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ ,  $I$ (А),  $\Phi$  (Вб), онда:

$$\Phi = F/R_\mu,$$

мұнда  $F$  – магнитқозғаушы күш:  $F = nI$ , (А-тармақтар)  $R_M$  – магниттік кедергі:  $R_\mu=L/\mu_0S$ , (Гн-1)

Қиманың бірлігіндегі магнит ағынының тығыздығы немесе магниттік индукция (В) есептеледі:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \mu_0 H \text{ (Вб/м)},$$

мұнда  $H$  - магнит өрісінің кернеулігі, ол магнитқозғаушы күштің ұзындық бірлігіне қатынасына тең

$$H = F/S, \text{ (Ф/м)}.$$

Магнит өзекшесі жоқ кезде орамда  $B$  шамасы орамнан өтетін ток жасайтын 1м<sup>2</sup> келетін күштік сызықтардың санын береді. Егер орамға магнит өзекшесін ендірсе, онда ток жасаған магнит өрісінің әсерінен ол магниттеледі және магнит материалының есебінен қосымша күштік сызықтар пайда болады, бұл магнит индукциясының күрт өсуіне, ал олай болса, магнит ағынының да өсуіне, алып келеді. Магниттелген материалдың жасаған қосымша күштік сызықтарының санын магниттелу деп атайды және ( $J$ ) деп белгілейді. Магниттелу магнит өрісінің кернеулігінен және заттың магниттік қабылдау коэффициентімен сипатталатын материалдың сапасынан тәуелді  $\chi$ .

$$J = \chi H.$$

Магниттік индукцияның көбейтілген мәні магнит өзекшесін ендіргеннен кейін болады:

$$B' = \mu_0 (H+J) = \mu_0 (H+\chi H) = \mu_0 (1+\chi)H,$$

мұнда  $\mu_0(1+\chi) = \mu^1$  өрнегі осы материалдың магниттік өтімділігі. Осы мәнді пайдаланып, алады:

$$B^1 = \mu^1 H \text{ немесе } \mu^1 = \frac{B^1}{H}.$$

Әдетте магниттік материалдың сапасын сипаттау үшін  $\mu'$  салыстырмалы магниттік өтімділігі деп аталатын  $\mu_0$  қатынасын пайдаланады:

$$\mu = \frac{\mu^1}{\mu_0} = 1 + \chi.$$

$\mu$  шамасы магнит өзекшесін орамға ендіргендегі магнит ағынының қанша есе өскенін көрсетеді. Өсу бірнеше ондаған мыңды құрауы мүмкін. Ұзындығы  $L$  және қимасы  $S$  өзекшенің магниттік кедергісін есептейді:

$$R_\mu = L/\mu^1 S = L/\mu\mu_0 S.$$

Сонымен, өзекшені енгізу  $\mu$  есе магниттік кедергіні төмендетеді, яғни берілген магнитқозғаушы күште  $\mu$  есе магнит ағынын көбейтеді:

$$\Phi^1 = \mu\Phi.$$

Барлық қатты заттар магниттік өтімділік шамасы бойынша бөлінеді:

- а) диамагнетиктер  $\mu < 1$ ;
- б) парамагнетиктер  $\mu > 1$ ;
- в) ферромагнетиктер  $\mu \gg 1$ .

Өзінде магнит өрісін шоғырландыратын заттар - ферромагнетиктер.

Магнит өрісіне немқұрайлы заттар - бұл диамагнетиктер және парамагнетиктер.

Табиғатта барлық заттар қарапайым магнетиктер, яғни олардың магниттік қасиеттері бар, олар магнит өрісін жасайды. Өрістер атомдар деңгейінде қарапайым бөлшектермен жасалынады. Атомдардың магниттік қасиеттері электрондардың магниттік қасиеттерімен анықталады. Басқа бөлшектердің магнетизмі салыстырмалы аз.

Нәтижесінде ферромагнетиктердің домендік құрылымы пайда болады.

Ферромагнетиктің көлемі (ФМ) өздігінен локалды аймақтардың үлкен санына - домендерге бөлінеді, олардың әр қайсысы техникалық қанығу жағдайындағы магнит болып келеді. Домендерде атомдардың қарапайым магнетиктері өздігінен бір жаққа бағытталған. Домендердің болуы тәжірибемен дәлелденген (Акулов-Битгердің ұнтақ бейнелері және басқалар). Домендердің сызықты мөлшерлері мм 0,001 ден 0,1 үлесін құрайды.

Ферромагнетиктің магниттелмеген көлемінде домендердің магниттік иінкүштерінің бағыты бірқалыпты ықтималды. Сондықтан макротілімнің нәтижелік магниттік иінкүші нөлге тең болады (магниттік тізбегі тұйықталған домендік құрылым).

Домендер өзара шекаралық қабырғалармен бөлінген, оларда бір доменнің басқасына магниттелу векторының бағыты баяу өзгереді.

Магниттелу қисығы және гистерезис тұзағының фигурасы бойынша барлық магниттік материалдар 3 топқа бөлінеді:

- магнитжұмсақ материалдар (ММ);
- магнитқатты материалдар (МТ);
- арналымы арнайы магнит материалдары.

Магнитжұмсақ материалдардың сипатты қасиеттері әлсіз магнит өрістерінде қанығуға дейін магниттелу қасиеті (жоғары магниттік өтімділігі) және қайта магниттелудегі аз шығындары. ММ материалдарының бұл қасиеттері электр машиналарының магнитөткізгіштері үшін, өлшеуіш аспаптарында, телефондарда және магнит өрісін шоғырландырумен байланысты басқа мақсаттар үшін оларды қажет етеді.

#### **4.1 Заттардың магниттік қасиеттері туралы жалпы мәліметтер**

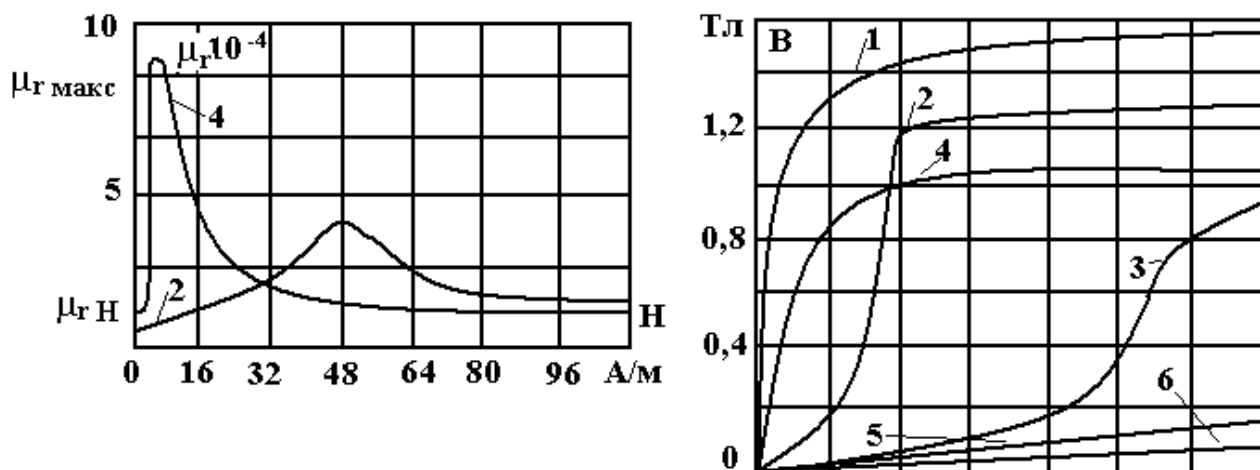
Магниттік зат ретінде техникалық маңызы бар ферромагниттік заттар және ферромагниттік химиялық қоспалар (ферриттер) қолданылады.

Ферромагнетизм құрылысы кейбір заттардың ішінде белгілі температурадан (Кюри нүктелерінен) төмен кезде магниттік домендерде электронды спиндер бір – біріне параллель бағыттанып құрылады.

Сыртқы магниттік өрістің әсерімен ферромагниттік заттың магниттелу процесінде ең кіші бұрышы бар домендер өседі, ал басқа домендердің мөлшері азаяды. Домендердің өсуі тоқтап, барлық магниттелген монокристалдар өрістің бағытымен бейімделгенде магниттік қанығу басталады.

- 1 – өте таза темір
- 2 – таза темір (99,98 Fe, %);
- 3 – техникалық таза темір (99,92 Fe, %);
- 4 – пермоллой (78 Ni, %);
- 5 – никель;
- 6 – темір – никель қоспалары (26 Ni, %);

Ферромагниттік монокристалдарды магниттеген кезде олардың сызықты мөлшерінің өзгеруі байқалады; бұл құбылыс магнитострикция деп аталады. Магнитострикциялық заттың магниттеу процесінің өтуі әдетте  $B$  (H) магниттеу қисықтарымен сипатталады (4.1 сурет). Салыстырмалы магниттік өтімділік – негізгі магниттеу қисық бойынша  $B$  индукциясының сәйкестігі  $H$  магнит өрісіне қатынасы.



4.1 сурет - Магниттік индукцияның және салыстырмалы магниттік өтімділіктің өрістен тәуелділік қисықтары

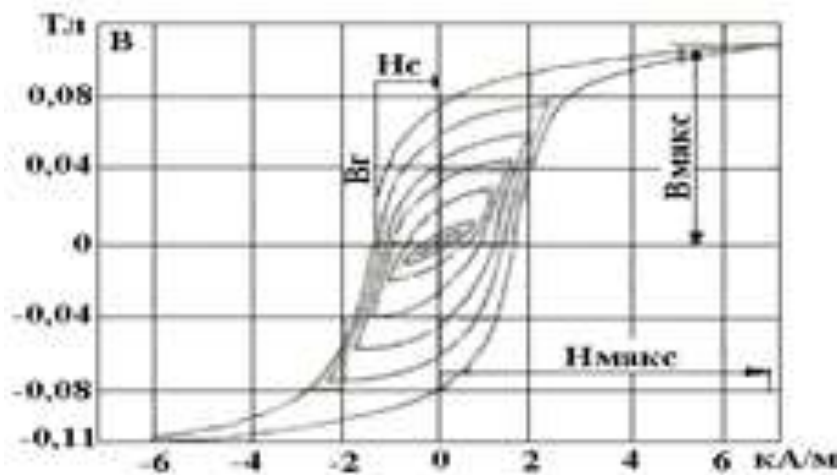
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (4.1)$$

Күшті өрістерде магниттік қанығу саласында магниттік өтімділік бірге ұмтылады. Айнымалы магниттік өрістерде ферромагниттердің сипаттамасы ретінде ең үлкен кернеулігінің мәніне қатынасын алады. Оны - ( $\mu$ ) деп белгілейді де, динамикалық магниттік өтімділік деп атайды. Айнымалы өрістің жиілігі өскенде магниттік процестердің инерциялығына байланысты  $\eta$  азаяды.

Ферромагниттік заттардың магниттік өтімділігі температурадан тәуелді, ол максимумнан Кюри нүктесіне жақын температура кезінде өтеді. Таза темір үшін Кюри нүктесі 1680 С, никель үшін 11300 С. Температура өзгерген кезде магниттік өтімділіктің өзгеруін сипаттау үшін магниттік өтімділіктің температуралық коэффициентін пайдаланады [ $K^{-1}$ ]:

$$TK\mu_r = \alpha_{\mu_r} = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{d\mu_r}{dt} \quad (4.2)$$

Егер де сызықты ферромагниттік бәсең магниттеуін өткізсе, ал кейбір негізгі магниттеу қисығының нүктесінен бастап өрістің кернеулігін азайта бастаса, онда магнит индукциясы да азаяды, бірақ негізгі қисық бойынша емес, себебі гистерезис құбылысының салдарынан кешігеді. Кері бағытталған өрістің мәні өскенде өрнектің магниттік қасиеттерін жоюға болады, ал содан кейін қайта магниттеліп және магнит өрістің бағыты қайтадан өзгергенде өрнектің магниттелуін сипаттайтын бастапқы сипаттамасына қайтып келеді, яғни гистерезистің тұзағы пайда болады (4.2 сурет).



4.2 сурет - Гистерезис тұзағы, яғни B магнит индукциясының сыртқы магнит өрісінің H кернеулігінен тәуелділігі

Қаныққанға дейін магниттеліп, содан кейін магнитсіздендірілген өрнектің  $H = 0$  кезіндегі мәні  $B_r$  қалдық индукция деп аталады. Индукцияны  $B_r$  мәнінен нөлге дейін азайту үшін коэрцитивті күш ( $H_c$ ) деп аталатын кері бағытталған  $H_c$  кернеулікке назар аудару керек. Үлкен магниттік өтімділігі бар және  $H_c$  шамалы мәндері бар заттар жұмсақ магниттік заттар деп, ал магниттік өтімділігі шамалы және  $H_c$  үлкен мәндері бар заттар қатты магниттік заттар деп аталады. Ферромагниттерді айнымалы магнит өрістерде қайта - қайта магниттеу кезінде энергияның жылулық шығындары әрдайым байқалады. Олар гистерезиске және құйынды тоқтарға кететін шығындар. Құйынды тоқтарға кететін шығындар ферромагниттің электр кедергісінен тәуелді, яғни неғұрлым ферромагниттің меншікті кедергісі үлкен болса, соғұрлым құйынды тоқтарға кететін шығындар аз болады. Заттың көлем бірлігінде гистерезиске кететін бір цикл кедергі шығындары тең

$$W_{HI} = \eta B_{\max}^n, \quad (4.3)$$

мұнда  $\eta$  - заттан тәуелді коэффициент;

$B_{\max}$  - цикл ішінде максималды индукция;

$n = 1,6 \dots 2$  тең дәреже көрсеткіші.

Гистерезиске жұмсалатын қуат мынаған тең

$$P_H = \eta f B_{\max}^n V, \quad (4.4)$$

мұнда  $f$  - тоқтың жиілігі;

$V$  - ферромагниттің көлемі.

Құйынды тоқтарға жұмсалатын қуат мынаған тең

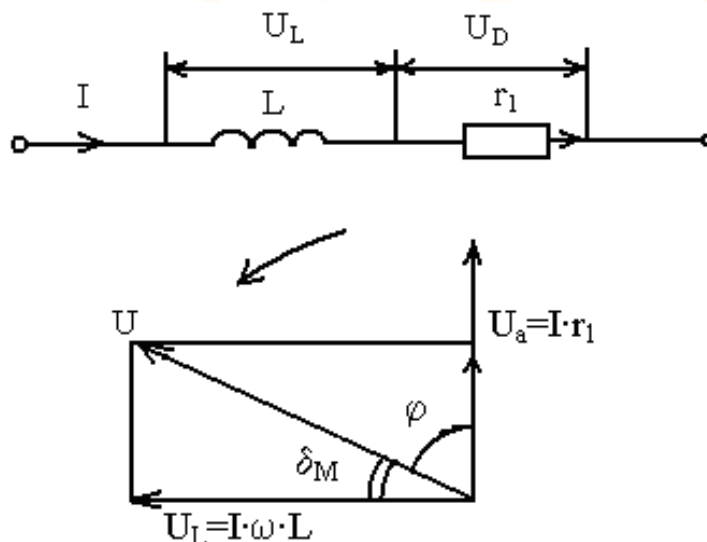


$$P_f = \xi f^2 B_{\max}^2 Y, \quad (4.5)$$

мұнда  $\xi$  – ферромагниттің түрінен тәуелді коэффициент.  $P_f$  – жиіліктің екінші дәрежесінен, ал  $P_H$  – бірінші дәрежесінен тәуелді болғандықтан, бірінші кезде жоғары жиілік кезінде  $P$ , яғни құйынды токтардың шығындарын есепке алу керек. Айнымалы ток тізбектерінде кейбір кезде индуктивтік орауыштарда қуаттың шашырап тарауын магнит шығындардың тангенс бұрышымен бағалайды. Магниттік заттан өзекшесі бар индуктивтік орауышты тізбектеп қосылған  $L$  индуктивтіктен және  $r$  кедергісінен құралған сұлба ретінде көрсетуге болады (өзіндік сыйымдылықты және ораманың кедергісін есепке алмағанда), ал бұл жағдайда векторлық диаграммадан табады (4.3 сурет).

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{r_1}{\omega L}. \quad (4.6)$$

Молибден және хром пермаллойының меншікті кедергісін, басты магниттік өтімділігін үлкейтеді және деформацияға әсерлігін азайтады. Бірақ, сонымен бірге қанығу индукциясы да төмендейді. Мыс  $\mu$  тұрақтылығын үлкейтеді, температуралық тұрақтылықты және меншікті кедергіні көтеріңкі етеді және қорытпалардың механикалық өңдеуін жеңілдетеді. Кремний және марганец меншікті кедергіні үлкейтеді. Пермаллойдың маркаларында Н әрпі никельді көрсетеді, К – кобальтті, М – марганецті, Х – хромды, С – кремнийді, Д – мысты.



4.3 сурет - Индуктивтік орауыштың балама сұлбасы және векторлық диаграммасы

Марканың сындық белгісі никельдің қорытпа ішіндегі пайызын көрсетеді. Пермаллойды қолдану. 45Н және 50Н және 50Н қорытпаларынан

жоғары индукция кезінде жұмыс істейтін көлемі шамалы күшті трансформаторлардың өзекшелерін, дыбысты және жоғары жиілікті байланыс аппаратурасын жасайды. 79НМ, 80НХС, 76НХД қорытпаларды шамалы және серпінді трансформаторлардың өзекшелерін, магниттік экранды, магнит күшейткіштерді жасауға қолданады. Пермаллойдан жасалған жіңішке таспалар есептеу техника құралдардың есте сақтау қуыстарының заты ретінде пайдаланылады.

## Есептер

### Ферромагнетиктердің магниттелуі және магниттік өтімділігі

Тәжірибелік мәліметтерден белгілі,  $700^{\circ}\text{C}$  – да таза темірдің қанығу магниттелуі  $J_{ms}$   $T = 0\text{K}$  температурасындағы  $J_{mo}$  0,55 құрайды және  $J_{ms} = 0,296$   $J_{mo}$   $750^{\circ}\text{C}$  температурада. Тәжірибелік мәліметтерді экстраполяциялау жолымен темір үшін Кюри температурасын табыңыз.

Шешуі:

Қанығу магниттелуі  $\Theta_K$  Кюри нүктесіне жақындаған сайын күрт төмендейді. Осы нүктенің маңайында қатынас орындалады:

$$Y = J_{ms} / J_{mo} = a \sqrt{1 - \frac{T}{\Theta_K}},$$

мұнда  $a$  – осы материал үшін константа. Осыдан

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{\sqrt{1 - T_1 / (\Theta_K)}}{\sqrt{1 - T_2 / (\Theta_K)}}$$

және

$$\Theta_K = \frac{T_2 T_1 y_2^2}{y_1^2 - y_2^2} = \frac{1023 \cdot 0,55^2 - 973 \cdot 0,296^2}{0,55^2 - 0,296^2} = 1042\text{K} = 769^{\circ}\text{C}.$$

Қаныққанда таза темірдің магниттік индукциясы  $B = 2,2$  Тл. Темірдің кристал торының элементарлық ұяшығының қабырғасы  $a = 0,286$  нм көлемді – орталықтандырылған куб болып келеді, темірдің бір атомына келетін магниттік иінкүшті есептеу керек (Бордың магнетондарында).

## 4.2 Айнымалы магнит өрістеріндегі ферромагнетиктер

Өзекше материалы көлемінің бірлігіне келтірілген қайта магниттеуге кететін шығындар (меншікті шығындар)  $p_m = P_a / V = \mu_0 \omega H^2 \text{tg} \delta_m$  формуласымен есептелетінін дәлелдеңіз.

Трансформатордың өзекшесінде 50 Гц жиілікте магнит өрісінің 0,1 және 0,5 Тл индукцияларында гистерезис шығындары сәйкес 0,15 және 1,97 Вт/кг құрайды. Магнит өрісінің индукциясы 0,6 Тл 200 Гц жиіліктегі гистерезис шығындарын анықтау керек.

Шешуі:

Ферромагнетиктің көлем бірлігіндегі гистерезис шығындары  $P_r = \eta B_m^n f$  өрнегімен анықталады. Осыдан

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{\eta B_{m2}^n f}{\eta B_{m1}^n f} = \left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}}\right)^n;$$

$$n = \frac{\lg(P_{r2}/P_{r1})}{\lg(B_{m2}/B_{m1})} = \frac{\lg(1,97/0,15)}{\lg(0,5/0,1)} = 1,6;$$

$$\eta = \frac{P_r}{B_m^n f} = \frac{1,97}{(0,5)^{1,6} \cdot 50} = 0,12 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{Тл}^{1,6})}$$

$n$  және  $\eta$  коэффициенттері жиіліктен және магнит индукциясынан тәуелді болмағасын, шығындар құрайды:

$$P_{r3} = 0,12(0,6)^{1,6} \cdot 200 = 10,6 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

Трансформатордың өзекшесінде 1 және 2 кГц жиіліктердегі гистерезис және құйынды токтарға кететін қосынды меншікті магнит шығындары сәйкес құрайды 2 және 6 Вт/кг (өзекшеден өзгермейтін максималды индукцияда). 2 кГц жиіліктегі құйынды токтарға кететін магнит шығындарын есептеу керек.

### 4.3 Ферриттердің магниттік қасиеттері

Абсолюттік нөлдің жанында құрамы  $Y_3Fe_{4,5}Ga_{0,5}O_{12}$  аралас ферриттің магниттелуін есептеу керек, егер галлий кристал торында тетраэдрлық оттегі түйін аралықтарында орналасқаны белгілі болса. Галлийді иттрийлік феррогранатқа қосқанда Кюри температурасы қалай өзгереді?

Иттрий және темір оксидтерін масса бойынша қандай қатынаста араластыру керек екенін есептеу керек, егер олардың бірігіп қалғанында стехиометриялық құрамды иттриялық феррогранатын алу үшін.

Диаметрі  $D_\phi = 10$  мм қимасы жұмыр феррит сырықтардың кеуектігі (пористость) 3% құрайды. Сырықтар керамикалық технология бойынша алдын – ала престелген дайындаманы күйдіру жолымен жасалған. Дайындамалар диаметрі  $D_3$  қандай болу керек, егер олардың кеуектігі 27%

құраса. Күйдіргендегі сырық ұзындығының салыстырмалы азаюын анықтау керек.

Шешуі:

Дайындамадағы және дайын ферриттегі материалдың жалпы саны өзгеріссіз қалады деп, жазады  $V_3(1 - 0,27) = V_\phi(1 - 0,03)$ , мұнда  $V_3$  және  $V_\phi$  – күйдіргеннен кейін дайындаманың және дайын сырықтың көлемі.

$V_3 = KD_3^3$  және  $V_\phi = KD_\phi^3$  есептеп, мұнда  $K$  – пропорционалдық коэффициенті, алады  $D_3 = D_\phi \sqrt[3]{(1 - 0,03)(1 - 0,27)} = 11$  мм. Күйдіргендегі сырық ұзындығының салыстырмалы азаюы:

$$\Delta l = (D_3 - D_\phi) / D_3 \approx 9,1 \%$$

Тор периоды 0,834 нм айналдырған шпигельдің құрылымында кристалға айналатын  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  никель ферриті үшін 0К температура маңайында қанығу индуктивтігін анықтау керек.  $\text{Fe}^{3+}$  және  $\text{Ni}^{2+}$  катиондарының магниттік иінкүштерін сәйкес  $5\mu\text{B}$  және  $2\mu\text{B}$  тең қабылдау керек.

#### 4.4 Магниттік материалдарды қолдану

Ұзындығы  $l = 50$  мм, диэлектриктік негізге оралған 200 орамшасы бар соленоидтың индуктивтігін табу керек. Негіздің көлденең қимасының ауданы  $S = 50$  мм<sup>2</sup>. Катушканың индуктивтігі қалай өзгереді, егер ауа саңлауының магнит қасиетінен айыратын әсеріне ескеріп анықталған  $\mu = 400$  магниттік өтімділігі бар цилиндрлік феррит өзекшесі оған ендірілсе?

Шешуі:

Диаметрімен салыстырғанда ұзындығы жеткілікті үлкен соленоидтың индуктивтігі:

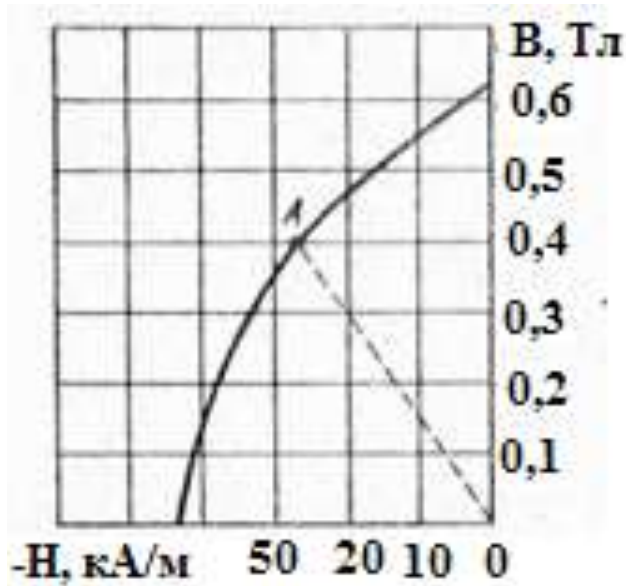
$$L_0 = \mu_0 \frac{n^2 S}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200^2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 50,2 \text{ мкГн.}$$

Магнит өзекшесін ендіргенде ораманың индуктивтігі өзекшенің магниттік өтімділігіне пропорционалды өседі:

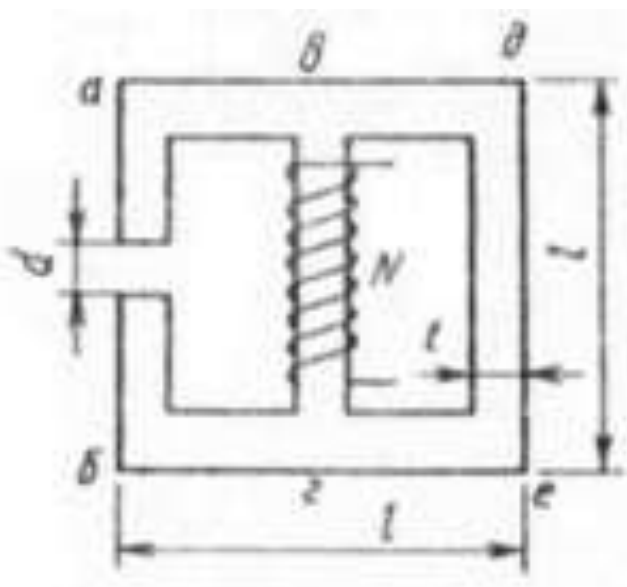
$$L_3 = \mu \mu_0 \frac{n^2 S}{l} = \mu \cdot 50,2 \cdot 10^{-6} = 400 \cdot 50,2 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ мГн.}$$

Орташа диаметрі  $d_{op} = 25$  мм сақиналы феррит өзекшесінің ауа саңлауы 1 мм. 500 тармақтан тұратын өзекше орамынан 0,17 А токты жібергенде саңлауда  $B_0 = 0,1$  Тл магнит индукциясы пайда болады. Ферриттің магниттік өтімділігін анықтау керек.

ЮНД8 қорытпасынан орта диаметрі  $D = 100$  мм және  $l_0 = 25$  мм саңлауы бар тұйықталмаған тороид түріндегі тұрақты магнит жасалған. Суретте қорытпаның магниттен айырылу қисығы көрсетілген. Ауа саңлауындағы магниттік индукция мен магниттік энергияны анықтау керек, егер магниттің көлденең қимасының ауданы  $S_m = 500$  мм<sup>2</sup> болса.



100 тармағы бар электрмагниттің орамынан  $I = 0,1$  А ток өтеді. Саңлаудағы магнит өрісінің кернеулігін анықтау керек, егер өзекшенің қимасы  $d = 1$  мм барлық айландаларда бірдей, материалдың магниттік өтімділігі  $\mu = 200$  болса. Өзекшенің түрі суретте көрсетілген, мұнда  $l = 5$  мм;  $t = 20$  мм.



## Есептік – графикалық жұмыстарға арналған есептер

1 Диаметрі 0,5 мм және ұзындығы 43 мм өткізгішті электр тізбегіне қосқанда өткізгіштің ұштарындағы потенциалдар айырмасы 2 А токта 2,4 В болды. Өткізгіш материалының меншікті кедергісін анықтау керек.

2 Сызықты кеңейудің температуралық коэффициентін және нихром сымның ұзаруын анықтау керек, егер температура 20 - дан 1000°C дейін өскенде сымның электр кедергісі 50 – ден 56,6 Омға дейін өзгерсе. Салқын жағдайда сымның ұзындығы  $l = 50$  м. Нихромның меншікті кедергісінің температуралық коэффициенті  $15 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ .

3  $\Delta T$  температурасының 20 – дан 200°C дейін өзгергенде мыстың  $\lambda T$  меншікті жылу өткізгіштігі неше есе өзгертетінін анықтау керек.

4 Бөлме температурасында мыстың меншікті кедергісінің өлшенген мәні бойынша  $\rho = 0,017$  мкОм·м оның меншікті жылу өткізгіштігін есептеу керек.

5 Кедергісі 5 Ом термोजұптан және кедергісі 8 Ом гальванометрден тұратын тізбектегі ток 0,5 мА тең, егер термोजұптың дәнекерленген жері ыдыстағы қайнаған суда тұрса. Қоршаған ортаның температурасы 20°C термोजұптың меншікті термоЭҚК неге тең?

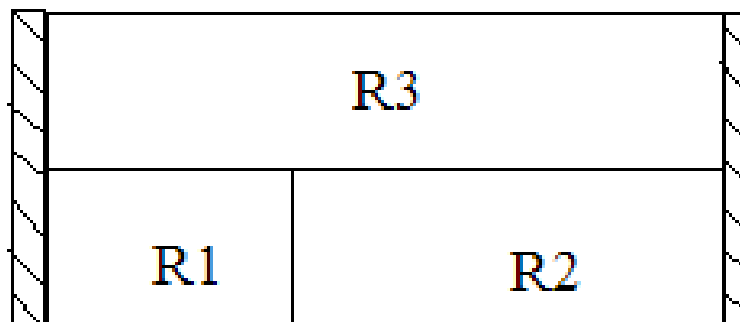
6 Термोजұптың Pt – (90%Pt + 10%Rh) көмегімен пеште температураны өлшегенде вольтметр 7,82 мВ көрсетті. Термोजұптың салқын ұшының температурасы 100°C тұрақтанды. Осы термोजұп үшін градуировка жасайтын кестені пайдаланып, пештегі температураны анықтау керек.

T, °C	0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Термо ЭҚК, мВ	0	0,11	0,65	1,44	2,33	3,25	4,23	5,24	6,27	7,34	8,47	9,61

7 Ені 1 см қалыңдығы 1 мм никель таспасынан кедергісі 0,4 Ом шунт жасау керек. Никель таспасының ұзындығы қандай болу керек, егер никельдің меншікті кедергісі 0,068 мкОм·м болса?

8 Тізбекке ұзындығы және диаметрі бірдей мыс және нихром сымдары бірізді қосылған. Сымдардағы кернеулер құлауларының қатынасын табу керек. Мыс пен нихромның меншікті кедергілері тең 0,017 және 1 мкОм·м.

9 Үлпек резистордың үш айланының кедергілері тең:  $R_1 = 10$  Ом;  $R^2 = 20$  Ом;  $R^3 = 30$  Ом. Резистордың кедергісін анықтау керек.



10 ЭҚК 250 В, ішкі кедергісі 0,1 Ом генератордан тұтынушыға ұзындығы 100 м екі сымды желіні тарту керек. Сымдарды жасауға алюминийдің қандай массасы кетеді, егер максималды тұтынатын қуат 22 кВт, кернеу 220 В болса.

11  $l = 5$  км қашықтыққа электр энергиясын жеткізу үшін қандай тұрақты кернеумен беру керек, егер  $j = 2,5 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup> токтың тығыздығында электр берілістің екі сымдық желісінің мыс сымдарында энергия шығындары  $n = 1\%$  аспаса.

12 Кернеуі 20 кВ генератордан 2,5 км қашықтықтағы тұтынушыға 1000 кВт қуатты жеткізу керек. Мыс сымдарының минималды қимасын анықтау керек, егер желідегі қуат шығындары 2% аспау керек болса.

13 Ұзындығы 10 м константан сымынан жасалған толық қосылған реостаттағы кернеудің құлауын есептеу керек, егер токтың тығыздығы 5 А/мм<sup>2</sup> болса. Константанның меншікті кедергісі 0,5 мкОм·м.

Ұзындығы 0,2 м графит сырығына 6 В кернеу берілген. Кернеуді бірінші бергендегі токтың тығыздығын анықтау керек, егер графиттің меншікті кедергісі  $4 \cdot 10^{-4}$  Ом·м болса.

14 Мыс сымынан жасалған катушканың кедергісі 10,8 Ом. Мыс сымының массасы 0,3 кг. Катушкаға оралған сымның ұзындығы мен диаметрін анықтау керек.

15 Электрмагниттік өрістің 50 Гц және 1 МГц жиіліктерінде мыс өткізгішіне ену тереңдігін есептеу керек.

16 Ұзындығы және кедергілері бірдей мыс және алюминий сымдары бар. Осы сымдардың диаметрлерінің қатынасын анықтау керек. Алюминий сымының массасы неше есе мыс сымының массасынан аз?

17 Кюри нүктесінің маңында ферромагниттік материалдар үшін меншікті кедергінің температурадан тәуелділігінің графигінде неге бүкпе (излом) бар?

18 Тұрғынжайды жылыту үшін кернеуі 220 В торапқа қосылатын электр каминді пайдаланады. Тұрғынжай тәулігіне 105 кДж жылуды жоғалтады. Ондағы температураны тұрақты деңгейде ұстау талап етіледі. Табу керек: а) қыздырғыш элементтің кедергісін; б) қыздырғыш элементке оралатын диаметрі 0,7 мм нихром сымының ұзындығын; в) қыздырушының қуатын. Нихромның меншікті кедергісі 1 мкОм·м.

### **Есептердің дұрыс жауаптары**

1.1.5  $\sigma_1 = 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>;  $\sigma_d = 8,85 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>;

1.2.20  $E_1 = 857$  В/м;  $E_2 = 571$  В/м;

1.2.24  $\alpha_p = -0,0687$  К<sup>-1</sup>;  $\rho^2 = 1,56 \cdot 10^{14}$  Ом·см;

1.2.21  $I/I_n = 0,033$ ;

1.3.4  $p = 6,58 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup>;

1.3.18  $U = 2033$  В;

- 1.4.28  $U_{\text{пр}} 1,27$  есе азаяды;
- 1.5.25  $\Delta l = pV_o/q = 2,5 \cdot 10^{-11} = 0,025$  нм;
- 1.5.32  $\text{tg} \delta = S_n / (\pi x n \mu m)$ ;
- 1.5.38  $\sigma_1 = 2,83 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>;
- 1.5.40  $U = 5,77$  В;
- 2.1.19  $n_i = 7 \cdot 10^{15}$  м<sup>-3</sup>;
- 2.1.32  $n_i \gg (N_d - N_a)$ , яғни жартылай өткізгіш өзінің қасиеттері бойынша меншіктіге жақын;
- 2.1.33  $W_c - W_F = 0,179$  эВ;
- 2.2.11  $p = 2,87 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>;
- 2.2.18  $n = \frac{n_i^2}{p} = 6,72 \cdot 10^{17}$  м<sup>-3</sup>;
- 2.2.19  $\gamma_i / \gamma_{\text{min}} = 1,065$
- 2.2.34  $\Delta \gamma_i / \gamma_i = 1,73\%$ ;
- 2.5.20  $\Delta UT = \alpha T \Delta T = 2,8$  мВ;
- 2.5.21 меншікті термоЭҚК 4,3% өседі;
- 2.7.5  $\phi_k = 0,326$  В;
- 2.7.20  $\phi_k = 0,35$  В;
- 2.7.27  $U_{\text{пр}} = 407$  мВ;
- 2.7.4  $e \phi_k = k T \ln \frac{P_p n_n}{n_i^2}$  ;
- 3.2.23  $dn(u) = 8\pi(mn/n)3u^2 du$ ;
- 3.3.6  $\alpha_T = \pi^2 \frac{k}{c} \frac{kT}{W_F} = 4 \frac{\text{мкВ}}{\text{К}}$  ;
- 3.4.23  $KR = 12$ ;
- 4.1.18  $M = 2,21$ ;
- 4.2.7  $P_a = H^2 \mu_0 \omega \text{tg} \delta m$ ;
- 4.2.9  $P_T = 4$  Вт/кг;
- 4.3.8 Кюри температурасы азаяды;
- 4.3.9  $mY_2O_3 / mFe_2O_3 = 0,847$ ;
- 4.3.1  $B_s = 0,32$  Тл.

### Негізгі белгілеулердің тізімі

- $e$  – электронның заряды, ЭҚК лездік мәні
- $h$  – Планктың тұрақтысы, қалыңдық
- $j$  – токтың тығыздығы
- $J$  – магниттелу
- $K$  – кристал ұяшығының еселігі
- $k$  – Больцманның тұрақтысы
- $k_m$  – магниттік қабылдағыштық
- $L_n$  – электрондардың диффузиялық ұзындығы
- $L_p$  – кемтіктердің диффузиялық ұзындығы
- $m_n$  – электронның эффективтік массасы
- $m_p$  – кемтіктің эффективтік массасы



$N$  – бөлшектер саны, қоспалардың шоғырлануы  
 $N_c$  – өткізгіштік аймағындағы жағдайлардың эффективтік тығыздығы  
 $N_v$  – валенттік аймақтағы жағдайлардың эффективтік тығыздығы  
 $N_d$  – донорлардың шоғырлануы  
 $n$  – электрондардың шоғырлануы, тармақтар саны,  
 $n_o$  – электрондардың теңгерімді шоғырлануы  
 $n_i$  – электрондардың өзіндік шоғырлануы  
 $P$  – полярлану, қуат  
 $P_a$  – активтік қуат, диэлектрлік шығындар  
 $p_o$  – кемтіктердің теңгерімді шоғырлануы  
 $p_i$  – кемтіктердің өзіндік шоғырлануы  
 $Q$  – заряд, жылу саны  
 $q$  – элементарлық заряд  
 $R$  – шағылысу коэффициенті, әмбебап газ тұрақтысы  
 $RH$  – Холл коэффициенті  
 $W_o$  – иондалу энергиясы  
 $W_c$  – өткізгіштік аймағының түбіне сәйкес энергия  
 $W_F$  – Ферми энергиясы  
 $W_i$  – тыйым салынған аймақтың ортасына сәйкес энергия  
 $W_v$  – валенттік аймақтың төбесіне сәйкес энергия  
 $\alpha$  – температуралық коэффициент  
 $\alpha_T$  – меншікті термоЭҚК  
 $\gamma_i$  – жеке меншікті өткізгіштілік  
 $\Delta$  – электрмагнит өрісінің ену тереңдігі  
 $\Delta W$  – тыйым салынған аймақтың ені  
 $\Delta W_a$  – акцепторлардың иондалу энергиясы  
 $\Delta W_d$  – донорлардың иондалу энергиясы  
 $\delta_m$  – магниттің шығындардың бұрышы  
 $\varepsilon = \varepsilon_1$  – салыстырмалы диэлектрлік өтімділік  
 $\varepsilon_o$  – электрлік тұрақты  
 $\Theta_k$  – Кюри температурасы  
 $\mu$  – салыстырмалы магнит өтімділігі, заряд тасушыларының жылжымалылығы  
 $\mu_o$  – магнит тұрақтысы  
 $\mu_n$  – электрондардың жылжымалылығы  
 $\mu_p$  – кемтіктердің жылжымалылығы  
 $\mu_n$  – бастапқы магниттік өтімділік  
 $\mu_{эф}$  – эффективтік магниттік өтімділік  
 $\nu$  – жиілік  
 $\rho$  – меншікті кедергі  
 $\sigma$  – зарядтардың беттік тығыздығы  
 $\chi$  – диэлектрлік қабылдағыштық  
 $\Psi$  – ағынның ілінісуі  
 $\omega$  – бұрыштық жиілік

## Кейбір физикалық тұрақтылар

Электр тұрақтысы  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м

Магнит тұрақтысы  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

Электрон тынымының массасы  $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг

Электронның заряды  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл

Жарықтың жылдамдығы  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с

Авогадро саны  $N_0 = 6,022 \cdot 10^{23}$  кмоль<sup>-1</sup> =  $6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>

Планк тұрақтысы  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с =  $4,14 \cdot 10^{-15}$  эВ·с

Больцман тұрақтысы  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К

Бор магнетоны  $\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл

Бор радиусы  $a_0 = 0,5292 \cdot 10^{-10}$  м

Фарадей тұрақтысы  $F = 9,648 \cdot 10^4$  Кл·моль<sup>-1</sup>

Лоренц саны  $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>·К<sup>-2</sup>

Әмбебап газ тұрақтысы  $R = 8,314$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>

1 эВ =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Дж

## Әдебиеттер тізімі

1. Бекмағамбетова К.Х. Электротехническое материаловедение. – Алматы: «Ғылым», 2000.-256 б.
2. Алиев И.И., Колганова С.Г. Электротехнические материалы и изделия: Справочник. – М.: Academia, 2005 – 270 б. Алиев И.И., Колганова С.Г.
3. Бекмағамбетова Қ.Х., Күзембаева Р.М. Электротехникалық материалтану. Дәрістер конспектісі. (050718 – Электроэнергетика мамандығына арналған барлық оқу түрлерінің студенттері үшін жинағы). Алматы: АЭЖБИ, 2008.
4. Бекмағамбетова Қ.Х., Күзембаева Р.М., Дуйсенова Ш.Т. Электротехникалық материалтану. (050718 – Электроэнергетика мамандығына арналған есептеу-графикалық жұмыстарын орындауға әдістемелік нұсқаулар). Алматы: АУЭС, 2012.
5. Бекмағамбетова Қ.Х., Күзембаева Р.М. Аухадиева Н.С. Электротехникалық материалтану. (050718 – Электроэнергетика мамандығына арналған барлық оқу түрлерінің студенттері үшін зертханалық жұмыстарына арналған әдістемелік нұсқаулар). Алматы: АИЭС, 2006.

## Мазмұны

Кіріспе.....	3
Электрлік қасиеттері бойынша заттардың топталуы.....	4
Магниттік қасиеттері бойынша заттардың топталуы.....	5
1 Диэлектриктер.....	6
1.2 Диэлектриктің өрістенуі және оның электр өтімділігімен байланысы.....	7
1.3 Диэлектриктердің электрөткізгіштігі.....	12
1.4 Диэлектрлік шығындар.....	14
1.5 Диэлектриктердің тесілуі.....	15
1.6 Белсенді диэлектриктер.....	16
2 Жартылай өткізгіш материалдар.....	16
2.1 Жартылай өткізгіштердің электрөткізгіштігі.....	21
2.2 Гальваномагниттік және жылуэлектрлік құбылыстар.....	23
2.3 Жартылай өткізгіштердегі түйіспелік және беттік құбылыстар.....	24
3 Өткізгіш материалдар.....	24
3.1 Өткізгіштердің негізгі электрлік және физикалық қасиеттері және оларға сыртқы нышандардың әсері.....	26
3.2 Өткізгіштердің меншікті кедергісі.....	26
3.3 Меншікті кедергінің температуралық коэффициенті – $T_{кр}$ .....	27
3.4 Өткізгіш материалдардың негізгі қасиеттері.....	27
3.5 Метал және қорытпалардың электрөткізгіштігі.....	32
3.6 Түйіспелік құбылыстары және термоЭҚК.....	33
3.7 Метал және қорытпаларды қолдану.....	34
4 Магниттік материалдар.....	33
4.1 Заттардың магниттік қасиеттері туралы жалпы мәліметтер.....	37
4.2 Айнымалы магнит өрістеріндегі ферромагнетиктер.....	41
4.3 Ферриттердің магниттік қасиеттері.....	42
4.4 Магниттік материалдарды қолдану.....	43
Есептік – графикалық жұмыстарға арналған есептер.....	45
Есептердің дұрыс жауаптары.....	46
Кейбір физикалық тұрақтылар.....	49
Әдебиет тізімі.....	50