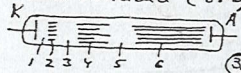


K-61 | Типи самостійного розряду

I Тілий розряд (низький тиск $P \sim 10^{-3} \text{ Па}$, $U_d = 100-200 \text{ В}$) відбувається електронів з катода відбувається внаслідок бомбардування його позитивними іонами (вторинка емісія) і фотонами, що утворилися в газі (фотоелект)

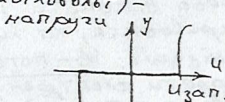
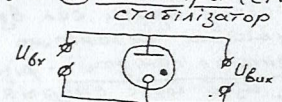
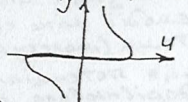
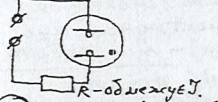


- 1) Тілий простір - розгон електронів
- 2) Тонкий світлий шар - збудження атомів електронами без іонізації
- 3) Тілий катодний простір - іонізація електронами ударом -

- 4) Тілого світіння - рекомбінація іонів, переходи атомів із збудженого у нормальний стан
- 5) Тілий Фарадєвський простір 6) Позитивний світлий стовп - іонізований газ

Застосування: 1) Розпилювання матеріалу катода - металеві дзеркала високої якості

- 2) Неонова лампа - індикатор напруги 2а) Стабілітрон (стабіловальт) - стабілізатор напруги

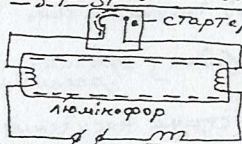


- 2б) Цифровий індикатор - неонова лампа з одним-двома андами і десятками катодів з дюралюмінію у вигляді цифр, газ світиться навколо того катода на який подано напругу

- 3) Газорозрядні дисерела світла - газосвітні трубки низького тиску - реклами

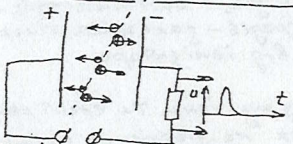
- 3а) Ртутна лампа - монохроматичне світло (певний колір, певна частота)

- 4) Газорозрядна люмінесцентна лампа - лампа денного світла



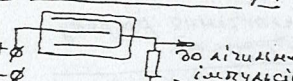
Заповнюється газом, що при розряді випромінює УФ світло, яке поглинається люмінофором і переіспромінюється видиме (фотолюмінесценція)

- 5) Детектори елементарних частинок - для реєстрації елементарних частинок ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$)



Іонізаційна камера (дозиметр) - пролітають частинки іонізують газ, у колі виникає імпульс струму (напруги), який подають на вхід електронного лічильника імпульсів

- 5а) Лічильник Гейгера - пролітання зарядженої частинки спричиняє лавину, що приводить до появи імпульсу напруги на R.



- II. Дуговий розряд (торкують електроди їх сильно розігрівають, потім розводять - термоселектронна емісія)

$U = 40-50 \text{ В}$ $I = 10-20 \text{ А}$ при $P = 1 \text{ атм}$ $T = 4000^\circ \text{С}$ при $P = 20 \text{ атм}$ $T = 7000^\circ \text{С}$

Застосування: 1) Зварювання металів 2) Електричні печі - металургія

- III. Ускровий розряд (II) пробій газового діелектрика при $E > E_{\text{критична}}$

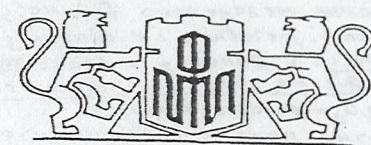
(повітря - нормальні умови - $E_{\text{кр}} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$) $T_{\text{канала}} = 10^4 \text{ К}$ $\hat{z} = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ с}$ (електронні лавини, фотоіонізація).

Блискавка ($I = 10000-500000 \text{ А}$, $U = 10^8 - 10^9 \text{ В}$, $\hat{z} = 10^{-6} \text{ с}$, $d \approx 350 \text{ Кл}$)

1) Зарядка... 2) Кульова блискавка...

- IV. Тілий розряд ($E > E_{\text{кр}}$) у вигляді оболонки, або корони, що охоплює електрод (втрата в АЕД, електрофільтри...)

Плазма... (90% Всесвіту)



Львівський фізико - математичний ліцей

Алексейчук Володимир Іванович

Конспекти з фізики

10 клас II семестр .

Електродинаміка

(Електричне поле . Електричний струм . Магнітне поле) .

м.Львів 1998-2000

K-31

Способи передачі взаємодії тіл

Близькодія... (ідея Фарадея...) Далекодія (дія на відстані) ...
 поле, $t \neq 0$ через п'якату, $t = 0$
 швидкість е.м. взаємодії $c = 300000 \text{ км/с}$

Матеріальним носієм взаємодії нерухомих зарядів є електричне поле;

I Матеріальне, воно існує незалежно від нас, від наших знань про нього (поле реальне, як і ретовина і є одним з видів матерії)

II має певні властивості: 1. Виникає навколо зарядів (заряд - джерело електричного поля). 2. Діє на заряди з певною силою $F = q \cdot E$ 3. Здатне виконати роботу $A_2 = q \cdot U_2$ - володіє енергією.

Стационарне електричне поле - електростатичне поле (незмінне з часом, створюється нерухомими ел. зарядами) вивають за допомогою пробного точкового позитивного заряду - q_p - пробний заряд...

I E - напруженість ел. поля - силова характеристика поля (основна)

$E = \frac{F}{q_p}$ - $E = F$ що діє на $q_p = 1 \text{ Кл}$ у даній точці поля

Напрямок E співпадає з F на q_p з боку поля $E = \left[\frac{H}{\text{Кл}} = \frac{В}{\text{м}} \right]$

Напруженість поля точкового заряду (сфери, кулі для $R > R_0$)

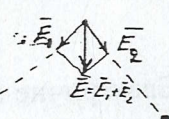
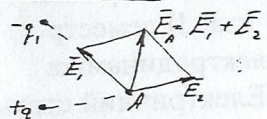
$$E = k \frac{q \cdot R}{R^2} \quad +q \quad -q$$

Поле точкового заряду -

центрально-симетричне

II Принцип суперпозиції полів... (з дослідів).

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$



III Електричне поле зображують за допомогою силових ліній або ліній напруженості: 1. Математична лінія, дотична до якої у кожній точці збігається з напрямком напруженості E у цій точці.

2. Потікаються на q і закінчуються на $-q$ 3. Не перериваються, не перетинаються 4. За густиною ліній оцінюють величину E поля.

1. 2. 3. 4. 5.

IV Електричний диполь... (полярні молекули)

$+q$ $-q$ l - плече диполя $p = q \cdot l$ - електричний дипольний момент

В однорідному полі на диполь діє пара сил яка намагається повернути диполь (поляризація).

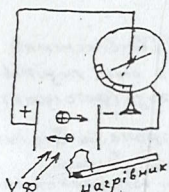
$M = q \cdot E \cdot l \cdot \sin \alpha = p \cdot E \cdot \sin \alpha$ $M = [p \cdot E]$ момент сил на диполь.

В неоднорідному полі крім моменту пари сил, на диполь діє сила в напрямі зростання напруженості поля (цим пояснюється притягання до наелектризованих тіл легких предметів)

$F = F_1 - F_2 = qE - q(E - \frac{dE}{dx}l) = q \frac{dE}{dx}l$ сила що діє на диполь в неоднорідному полі.

K-60

Струм у газах - газовий розряд.

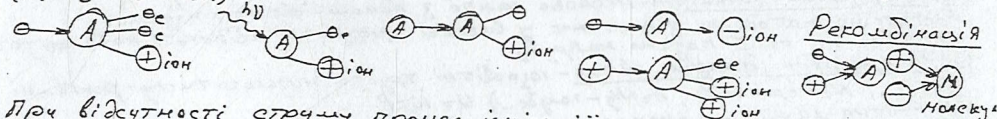


Газ < звичайні умови - діелектрик
 нагрівання, опромінення - провідник
 (УФ, рентгенівське, γ - проміння)

Носії струму у газах - електрони, $\oplus$ і $\ominus$ іони

Носії струму виникають при іонізації - відірв від атома або молекули газу одного або декількох електронів.

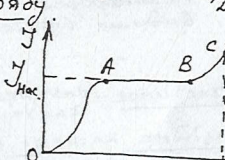
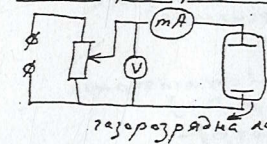
Відбувається під дією різних факторів (електромагнітне проміння - фотонна; удари електронів, іонів і інших атомів - ударна; підвищення температури - термічна). Для іонізації атома (молекули) треба виконати роботу проти сил взаємодії між електронами, що вивається, та іншими частинками атома (молекули) - A_i - робота іонізації. φ_i - потенціал іонізації - різниця потенціалів яку має пробний електрон, щоб його енергія дорівнювала роботі іонізації (A_i - з таблиць).



При відсутності струму процес іонізації = рекомендації (швидкість) Рекомендація супроводжується збільшенням енергії, частково вона збільшується у вигляді світла (е.м. випромінювання)

Газовий розряд супроводжується світінням (одна з причин рекомендації)

У-А характеристика розряду

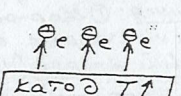
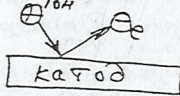
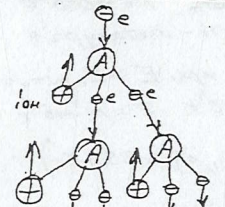


$I_{нас}$ - струм насичення - всі іони, що виникають при іонізації досягають електродів - залежить тільки від іонізатора.

I Несамостійний розряд (ОАВС) Носії струму іони та електрони, утворені стороннім іонізатором, витрачаються на утворення струму та на рекомендацію. Існує поки діє іонізатор.

II Самостійний розряд (СД) - настає самозабезпечення розряду іонами та електронами.

1. Іонізація електронним ударом... лавина... $K_e \geq A_i$ $eE\lambda = \frac{eU}{d} \geq A_i$	2. Вторинна емісія електронів... $K_{іон} \geq A_i$	3. Термоелектронна емісія... $T_{катод} \uparrow$
---	--	--



4. Фотоіонізація...

5. Іонна ударна іонізація...

Властивості самостійного розряду: починається з певного потенціалу - $U_{зап.}$, супроводжується світінням, не підлягає закону Ома, виділяється теплота, виникають збуджені атоми, змінюється структура молекули.

K-59 Електроліти - ретовини в яких носіями струму є іони (кислоти, солі, луги - їх розчини і розплави)

Струм в електролітах - перенесення ретовини.

Електроліз (Фарадей) - електрохімічні реакції біля електродів в електроліті при проходженні струму. Супроводжується виділенням ретовини на електродах.



ІЗ-н електролізу (Фарадея). $m = k \cdot I \cdot t = k \cdot q$...

$$m = m_0 \cdot N = \frac{M}{N_A} \cdot \frac{q}{F} = \frac{M}{N_A \cdot F} \cdot I \cdot t = \frac{1}{e \cdot N_A} \cdot \frac{M}{F} \cdot I \cdot t = k \cdot I \cdot t$$

$k = \frac{1}{e \cdot N_A} \cdot \frac{M}{F}$ - електрохімічний еквівалент = m ретовини на електроді при $q = 1 \text{ Кл}$ (з табл.) $k = \frac{M}{F \cdot N_A}$

$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{Z}$ - електрохімічний еквівалент ретовини прямо пропорційний хімічному еквіваленту $M = \frac{\text{молярна маса}}{\text{валентність}}$

$F = e \cdot N_A \approx 96500 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ - число Фарадея $\rightarrow e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Виникнення іонів - електролітична дисоціація - розпад молекул розчиненої ретовини на іони під дією молекул розчинника. $\text{HCl} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ дисоціація

Поруч з дисоціацією можливі і зворотні процеси - молекулізація (рекомбінація). В електролітах динамічна рівновага (дисоціація = рекомбінація) тобто дисоційована тільки частина молекул $\alpha = \frac{n_{\text{дис}}}{n}$ - коэф. дисоціації - показує яка частка всіх молекул розпадається на іони.

α залежить: ① від концентрації n розчину (при $n \rightarrow 0 \rightarrow \alpha \rightarrow 1$) ② в-діелектричної проникності розчинника ($\epsilon \rightarrow \alpha \uparrow$)

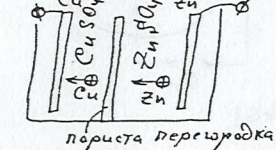
Струм в електролітах = тепловий + в'порядкований рух $\oplus$ і $\ominus$ іонів

Рух іонів відбувається з опором (в'язке тертя $F = \alpha_0 \cdot v$ - коэф. тертя). $qF = \alpha v \rightarrow v = \frac{q}{\alpha_0} E = \beta E$ β - рухливість іонів (з табл.) сольват...

$j = j_+ + j_- = e n_+ v_+ + e n_- v_-$ якщо $n_+ = n_- = n$ тоді $j = e n (v_+ + v_-) = e n (\beta_+ + \beta_-) E$

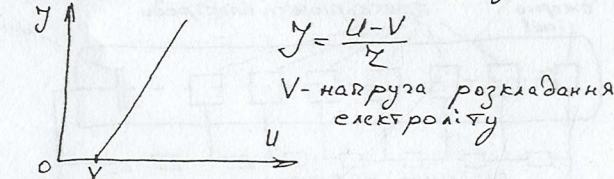
$\beta = e n (\beta_+ + \beta_-)$ - питомі провідності електроліту при $T \uparrow$ в'язкість зменшується $\alpha \uparrow \rightarrow \beta \uparrow R = R_0 (1 - \alpha t)$

Гальванічний елемент



Електродні потенціали. При зануренні металічного провідника в електроліт, метал відносно електроліту отримує певний електричний потенціал

V-A характеристика електроліту

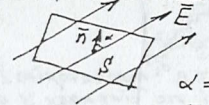


Застосування електролізу

1. Гальванопластика ...
2. Гальваностегія ... (нікелювання, хромування)
3. Очищення (рафінування) металів ...
4. Електрометалургія ...
5. Електролітичне травлення і полірування ...
6. Отримання D_2O ...

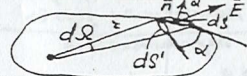
K-32 Φ - потік вектора напруженості ел. поля

I Однорідне поле



$\Phi = E S \cos \alpha = E_n \cdot S$ - потік напруженості пропорційний кількості ліній напруженості що пронизують поверхню $\alpha = (\vec{E}, \vec{n})$ $\vec{n}$ - нормаль до поверхні (додатній напрям, прийнято, - назовні)
 $E_n = E \cdot \cos \alpha$ - проекція $\vec{E}$ на нормаль.

II d Φ - елементарний потік напруженості



$$d\Phi = E_n dS \cdot \cos \alpha = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{dS \cos \alpha}{r^2} \text{ але } d\Omega = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}$$

III $\Phi = \int E_n dS$

- потік напруженості ел. поля через довільну замкнуту поверхню визначається інтегруванням або сумуванням всіх елементарних потоків. $\int$ - інтегрування по всій поверхні

$$\int E_n dS = \frac{q_{\text{внутр}}}{\epsilon_0}$$

- теорема Гаусса: потік вектора $\vec{E}$ крізь замкнуту поверхню рівен алгебраїчній сумі зарядів в середині цієї поверхні, поділений на ϵ_0

Дов-ня: Розрахуємо потік для точкового заряду $\int E_n dS = \int \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} d\Omega$ але $\int d\Omega = 4\pi$ тоді $\int E_n dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int d\Omega = \frac{q}{\epsilon_0}$

Якщо ел. поле створюється системою точкових зарядів, то згідно принципу суперпозиції $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \Rightarrow \int E_n dS = \int E_{n1} dS + \int E_{n2} dS + \dots = \frac{q_1}{\epsilon_0} + \frac{q_2}{\epsilon_0} + \dots = \frac{q_{\text{внутр}}}{\epsilon_0}$

Для зарядів, що не охоплюють поверхню $\int E_n dS = 0$ т.я. $\int_{S_1} E_n dS = \int_{S_2} E_n dS = 0$

Розподіл зарядів - характеризують густиною заряду ρ, σ, λ

Об'ємна $\rho = \frac{q}{V}$ Поверхнева $\sigma = \frac{q}{S}$ Лінійна $\lambda = \frac{q}{l}$

Застосування теореми Гаусса

I Поле рівномірно зарядженої площини II Плоский конденсатор...

З симетрії задачі $\rightarrow$ вектор $\vec{E} \perp$ площині. У якості замкнutoї поверхні виберемо циліндр, тоді $\Phi = 2 E_n \cdot S = \frac{q_{\text{внутр}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma \cdot S}{\epsilon_0} \rightarrow E_n = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ - поле нескінченної площини - однорідне

III Поле циліндра (дротини) - з міркувань симетрії поле має радіальний характер ($\vec{E}$ у кожній точці $\perp$ осі циліндра). Замкнута поверхня - коаксiальний циліндр.

$\Phi = E \cdot S = E \cdot 2\pi R h = \frac{\lambda \cdot h}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R}$ - поле циліндра (дротини) для $R > a$

IV Циліндричний конденсатор

V Поле рівномірно зарядженої кулі, сфери з міркувань симетрії - поле центрально-симетричне, замкнута поверхня - концентрична сфера $\Phi = E \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$ - поле кулі, сфери $R > R_0$

VI Сферичний конденсатор

К-33 Робота ел. поля по переміщенню заряду

I Однорідне поле

$A_{12} = F \cdot \delta \cdot \cos \alpha = q_0 E \Delta d = q_0 E (d_1 - d_2) =$
 $= -(q_0 E d_2 - q_0 E d_1) = -(W_2 - W_1) = -\Delta W$
 Для криволінійної траєкторії $A_{12} = q_0 E \Delta d$ т.з. траєкторію I можна розбити на ділянки x і y , при русі по ділянках y $\cos \alpha = 0$
 $A_{y0} = 0$ тоді $A_{12} = A_x = q_0 E \Delta d$

Робота ел. поля по переміщенню заряду не залежить від форми траєкторії, а визначається тільки потягом і кінцевим положенням заряду

II Поле неоднорідне (створене точковим зарядом) заряд q_0 переміщується з точки 1 в т.2.

$dA = F \cdot dr \cdot \cos \alpha = q_0 E \cdot dr \cdot \cos \alpha = q_0 E dr = k \frac{q_0 q_2}{r^2} dr$
 $A = \int_1^2 dA = \int_1^2 k \frac{q_0 q_2}{r^2} dr = k q_0 q_2 \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = -k q_0 q_2 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$
 $A = k q_0 q_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ робота ел. поля не залежить від траєкторії

$A = \oint q_0 E dr = \int_1^2 q_0 E dr + \int_2^1 q_0 E dr = 0$ Робота ел. поля по замкнутому контуру рівна 0

або $\oint E dr = 0$ - теорема про циркуляцію вектора E по замкнутому контуру

Електричне поле - потенціальне $A_0 = 0$ тоді A не залежить від траєкторії

Теорема про потенціальну енергію...
 $A = -\Delta W = (W_2 - W_1)$ в однорідному полі $W = qEd$
 в електричному полі...
 2) у полі точкового заряду $W = k \frac{q_0 q_2}{r}$

φ - потенціал ел. поля - енергетична характеристика ел. поля в даній точці

$\varphi = \frac{W}{q_0}$ $\varphi = W$ одиничного позитивного заряду в даній точці поля
 $\varphi = [V = \frac{Дж}{Кл}]$ вольт.

1) Однорідне поле (Умовності: потенціал негативної пластини приймають $= 0$, потенціал Землі $= 0$)

$\varphi = \frac{W}{q_0} = Ed$ d - відстані від пластини $\ominus$ $A = -q_0 (\varphi_2 - \varphi_1) = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$

2) Поле точкового заряду (прийнято потенціал точок у ∞ рівен 0)

$\varphi = k \frac{q}{r}$ $A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$
 екіпотенціальна поверхня... (поверхня провідника)
 $\varphi_1 = \varphi_2$ $\varphi_3 = \varphi_4$ $U_{12} = 0$ $U_{34} = 0$
 $\varphi_1 < \varphi_3$ $A_{13} < 0$ $A_{31} > 0$

Напряга - різниця потенціалів - дорівнює роботі ел. поля по переміщенню одиничного позитивного заряду з одної точки поля у другу.

$A = qU$ $1 Дж = 1 Кл \cdot В$ $1 еВ = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл \cdot В = 1,6 \cdot 10^{-19} Дж$
 зв'язок між потенціалами і напруженістю ел. поля

$1. \Delta x \rightarrow E$ $A = q E_x \Delta x = q (\varphi_1 - \varphi_2) = -q \Delta \varphi \rightarrow$
 $E_x = -\frac{d\varphi}{dx}$ мінус означає, що у напрямі поля потенціал зростає
 $E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta d} = -\frac{U}{\Delta d}$ зв'язок U і φ для однорідного поля $E = \left[\frac{В}{м} \right]$

Енергія диполя в ел. полі
 $-q_1 \cdot l + q_2 \cdot l = q (\varphi_2 - \varphi_1) = q \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} l = q l \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} = -p \cdot E$
 Енергія диполя тієї ж стійкої рівноваги!

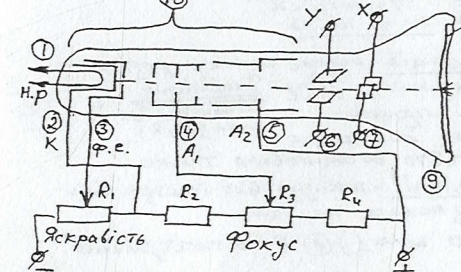
Принцип суперпозиції для потенціалів... $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$

К-58 Електронний пучок (промінь) - дірка в аноді

Властивості:

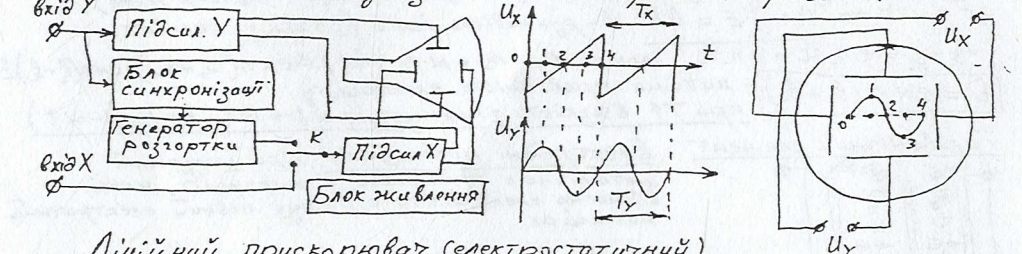
- I При бомбардуванні т.т. спричиняє їх нагрівання (вакуумна зварка, плавлення металів у вакуумі)
- II При різкому гальмуванні швидких пучків виникає рентгенівське проміння (рентгенівська трубка)
- III При бомбардуванні т.т. спричиняє їх світіння - катодолумінесценція (люмінофори: вілламіт Zn_2SiO_4 - зелене світіння, окис цинку ZnO - фіолетовий)
- IV Майже безінерційний
- V Легко керувати (фокусувати) електричними і магнітними полями (електричні і магнітні лінії).

Електронно-променева трубка

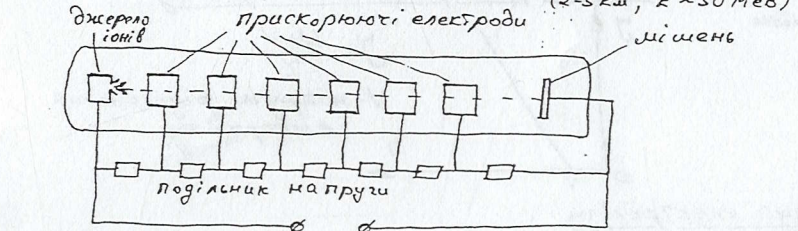


1. нитка розжарення
2. катод (торцевий)
3. керуючий електрод (сітка, модулятор)
4. перший анод A_1 (250-500 В)
5. другий анод A_2 (600-10000 В)
6. вертикально відхиляючі пластини
7. горизонтально відхиляючі пластини
8. люмінофор (люмінесцентний екран)
9. вакуумний балон (високий вакуум)
10. електронна гармата.

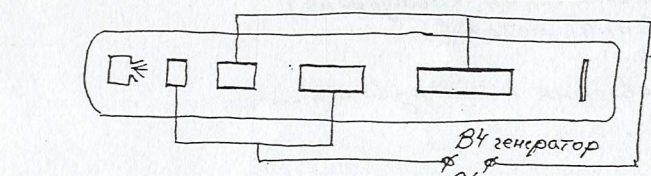
Осцилограф - прилад для запису і візуального спостереження швидкозмінних електричних процесів.



Лінійний прискорювач (електростатичний)



Лінійний резонансний прискорювач



K-57

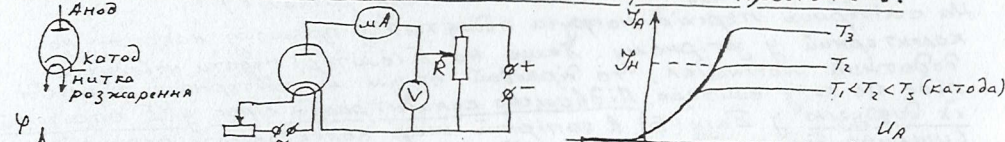
Струм у вакуумі ($P < 10^{-4}$ Па)

(відсутні власні носії струму - треба вносити джерело вільних зарядів - електронів (розігрітий катод))

Емісія електронів - вибивання електронів з метала.

Термоелектронна емісія - випускання електронів з метала при нагріванні (зумовлене тепловим рухом, якщо $K_{em} > A_{\phi}$, то електрон вилітає з метала, утворюючи навколо нього електронну хмару) Едісон 1883р.

Вакуумний діод - електронна лампа - одностороння провідність!

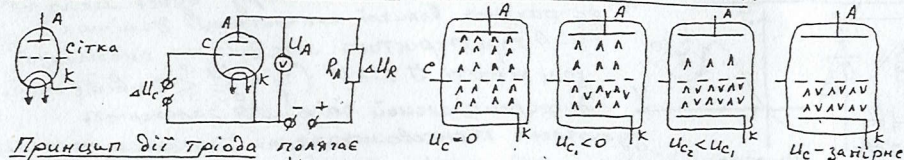


Нелінійну залежність I_A від U_A можна пояснити впливом просторового заряду між A і K на розподіл потенціалу в діоді. Якщо катод холодний (ел. хмара практично відсутня) тоді графік 1. Якщо між A і K є просторовий заряд (хмара) тоді розподіл 2. (При наявності просторового заряду швидкості руху електронів зменшуються)

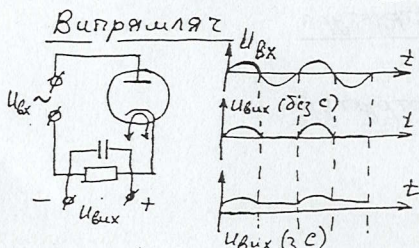
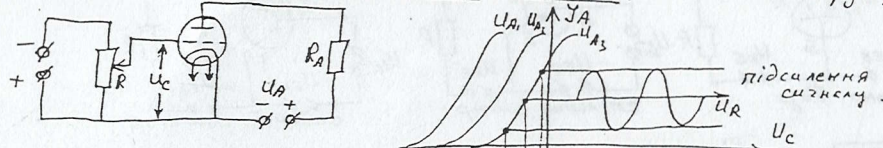
I_H - струм насичення - всі електрони, що вилітають з катода з 1 с, досягають анода.

Кількість емісуючих електронів визначається: 1. Рід металу 2. Температура з. домішки 3. Об'єм поверхні

Тріод - трьохелектродна електронна лампа (підсилювач).



Принцип дії тріода полягає в керуванні величиною I_A анодного струму за допомогою напруги U_c між сіткою і катодом. Тому сітку тріода називають керуючою. Зміна U_c викликає зміну ел. поля, що діє на просторовий заряд біля катода. Незначна зміна U_c приводить до значних змін I_A . При невеликих частотах тріод безінерційний (безінерційність втрачається коли час пробігу електрона від катода до анода одного порядку з періодом зміни U_c). Оскільки сітка ближче до катода, ніж анод, то її поле впливає сильніше на I_A , ніж поле анода. Для отримання однакової зміни I_A , сіткову напругу необхідно змінити значно менше, ніж анодну. Це дає можливість підсилювати напругу в колі сітки, за рахунок енергії джерела. При проходженні анодного струму I_A на опорі спад напруги U_R . Незначна зміна $U_c \rightarrow$ значна зміна ΔU_R (підсилення напруги)



K-34

Електричне поле в ретовині - мікрополе... макрполе...

Електростатична індукція (наведення) - виникнення некомпенсованих зарядів (індуковані заряди) різних знаків в ретовині при внесенні її в ел. поле, внаслідок зміщення позитивних і негативних зарядів (ядер, електронів). Індуковані заряди створюють додаткове поле, яке разом з зовнішнім полем утворює результуюче (воно завжди менше зовнішнього)

$$E_{\text{ретовини}} = E_{\text{зовн}} + E_{\text{індуков.}} = E_0$$

Провідники в електричному полі

Провідники - ретовини в яких є вільні носії зарядів (у металах - електрони). Вони виникають при фазовому переході тв. $\rightarrow$ рідина або т.т. внаслідок успішнішого валентних електронів, що відділяються від "своїх" атомів і утворюють електронний газ.

I В середині провідника ел. поле відсутнє $E_0 = 0$

(поля електронів провідності і $\oplus$ іонів метала взаємно компенсуються)

II В середині провідника, що перебуває в зовнішньому ел. полі, поле відсутнє $E_0 = 0$ (від дії зовнішнього поля електрони провідності

перерозподіляються (електростат. індукція) так, що поле електронів провідності і $\oplus$ іонів ($E_{\text{інд.}}$) компенсує $E_{\text{зовн.}}$. Поле не проникає у провідник.
 $E_0 = E_{\text{зовн.}} + E_{\text{інд.}} = 0$

Доведення: на основі 3.3.б. (якщо $E_0 \neq 0$ на е. діє $F \rightarrow U \rightarrow qV$ - неможливо)

III В середині зарядженого провідника $E_0 = 0$, а надлишкові заряди розподілені по поверхні ($\frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi R^2}$ - тим менший радіус кривизни поверхні (вістря) тим більша σ - поверхн. густина заряду. E поля біля поверхні зарядженого провідника.

З теореми Гауса, для циліндричної поверхні $q = E \cdot S = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E_{\text{поверх.}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ напрямленість поля біля поверхні зарядженого провідника.

IV Ел. поле E на поверхні провідника $\perp$ до поверхні. Інакше, дотичка до поверхні складає $E_{\text{т}}$ буде викликати переміщення зарядів по поверхні, що суперечить 3.3.б.

Поверхня провідника і весь його об'єм - еквіпотенціальні

V Ел. поле рівномірно зарядженої сфери.

Поле сфери - центрально-симетричне, напрям E у будь-якій точці проходить через O . За теоремою Гауса виділимо замкнуту поверхню - концентричну сферу $q = \oint E \cdot dS = 0$ для $R < R_0$ (зарядів в середині R -келасе)

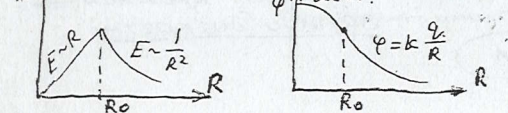
Поля в середині сферичної оболонки немає (доведіть це за принципом еквівалентності...)
для $R > R_0$ $q = E \cdot 4\pi R^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 R^2} = k \frac{Q}{R^2}$ - поле ззовні сфери.

VI Ел. поле рівномірно зарядженої (р) кулі

$q = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rho$
Поле - сферично-симетричне. Замкнута поверхня - концентр. сфера. За теоремою Гауса $q = \oint E \cdot dS = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$

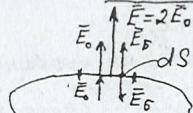
для $R > R_0$ $E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 R^2} = k \frac{Q}{R^2}$ - поле ззовні кулі

для $R < R_0$ $E = \frac{PR}{3\epsilon_0}$ або $E = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rho R}{4\pi \epsilon_0 R^2} = k \frac{Q R}{R_0^3}$ тобто $E \propto R$



K-35

Сила що діє на поверхню провідника з боку ел. поля.



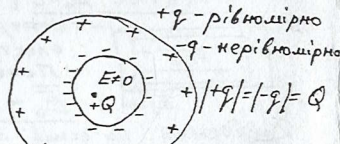
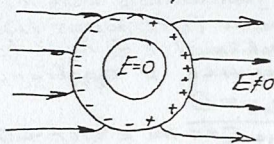
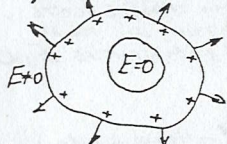
На малий елемент поверхні dS провідника діє сила $dF = \sigma \cdot dS \cdot E_0$. де $\sigma \cdot dS = dq$ - заряд елемента поверхні. E_0 - напруженість поля, що створюється всіма іншими зарядами системи у місці знаходження dS . E - напруженість поля біля поверхні провідника, тоді

$E = E_0 + E_1$ де E_1 - напруженість поля, що створюється зарядами даного елемента поверхні dS .

Зовні провідника $E = E_0 + E_1$ } $E_0 = \frac{E}{2} \Rightarrow dF = \sigma \cdot dS \cdot \frac{E}{2} \Rightarrow \frac{dF}{dS} = F_{од} = \frac{1}{2} \sigma E$

В середині провідника $E_0 = E_1 = 0$ } але $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ тоді $F_{од} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ сила, що діє на одиницю поверхні провідника - електричний тиск - поверхнева густина сили.

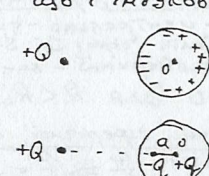
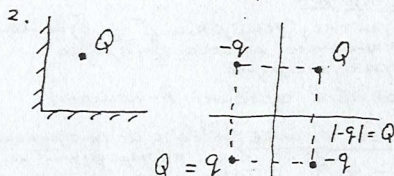
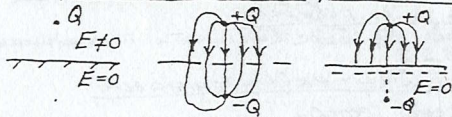
Електростатичний захист - екранування тіл (приладів) від впливу зовнішніх електростат. полів, ґрунтується на відсутності ел. поля в середині провідника і в порожнинах в провіднику



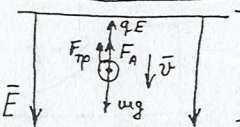
Частковий випадок замкнутої провідної оболонки - нескінченна провідна площина - простір з одної сторони електрично незалежний від простору з другої сторони.

Метод зображень - полягає в заміні реального розподілу зарядів фіктивними точковими зарядами, які разом з заданим зарядом Q створюють шукане поле (У. Томсон (Кембрідж))

1. Заряд і нескінченна провідна площина - замінимо взаємодію заряду Q з зарядом $-Q$ розташованим симетрично відносно площини. - Q фіктивний заряд, заміняє собою дію всіх індукованих зарядів, тобто створює таке саме поле, що і індуковані заряди



Дослід Мілікена (1909р. амер.) - пряме експериментальне вимірювання елементарного заряду.



У простір між об'єдками конденсатора вприскували краплинки масла, які рівномірно падали. Рівняння $\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g = \alpha U + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{повітря} g \Rightarrow \alpha = ?$

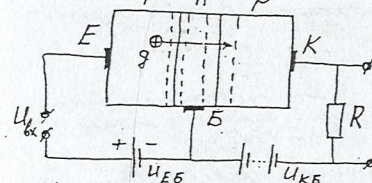
Потім накладали ел. поле так, щоб краплинки рівномірно піднімались вгору. $qE = mg + \alpha U \Rightarrow q = ?$

Огрома кількість краплинок масла і повітря між пластинами спостерігали стрибкоподібні зміни швидкості краплинок - стрибком мінявся заряд краплинок $\rightarrow$ заряди дискретні

$\Delta q = n|e|$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

K-56

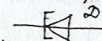
Транзистор - $n-p$ прилад, який являє собою комбінацію двох $p-n$ переходів



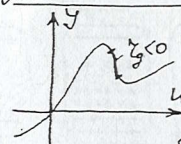
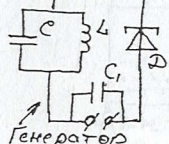
$p-n$ перехід між емітером (Е) і базою (Б) - емітерний
 $p-n$ перехід між базою (Б) і колектором (К) - колекторний

Один з режимів роботи - активний (для підсилення сигналів)

На емітерний перехід напруга подається у прямому напрямі, на колекторний у зворотному. Якщо на Е (емітер) подати невеликий додатний потенціал, то дірковий струм на емітерному переході піде по колу емітера. Підвищена концентрація дірок у Е спричиняє їх дифузцію у базу (Б), в зворотний шар колекторного переходу. (ширина бази < довжини дифузійного пробігу дірок). Ці дірки спричиняють появу струму в колекторному переході, у колі колектора піде струм ΔI . На робочому опорі R з'явиться напруга $\Delta I \cdot R$, яка значно перевищує амплітуду вхідної напруги $U_{вх}$. Таким чином, будь-яка зміна струму у колі Е, викликає зміну струму у колі К. Це ж справділиво і для напруг на Е і К. Зміна напруги на навантаженні $\Delta I \cdot R$ більша, за $U_{вх}$ - Підсилення напруги можливо створити підсилення струму, потужності



- Тунельний діод (товщина подвійного шару дуже мала $\sim 10^{-8}$, за рахунок великої концентрації домішок).

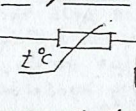
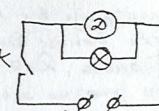
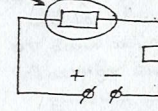


V-A характеристика має ділянку аномальної залежності I від U ($\gamma = \frac{dI}{dU} < 0$ - від'ємний диференціальний опір) ця залежність зумовлена квантовомеханічними тунельними ефектами. Диференціальний опір - опір у даній точці V-A характеристик для синусоїдального змінного струму з малою амплітудою.

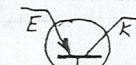
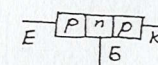
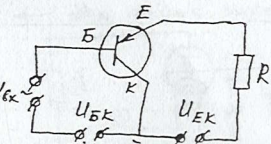
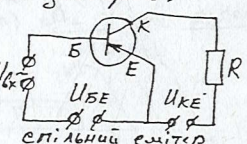
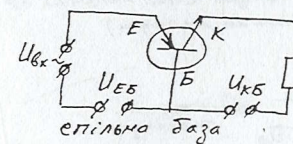
Фото

Реле

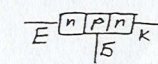
Термо



Схеми включення транзисторів:



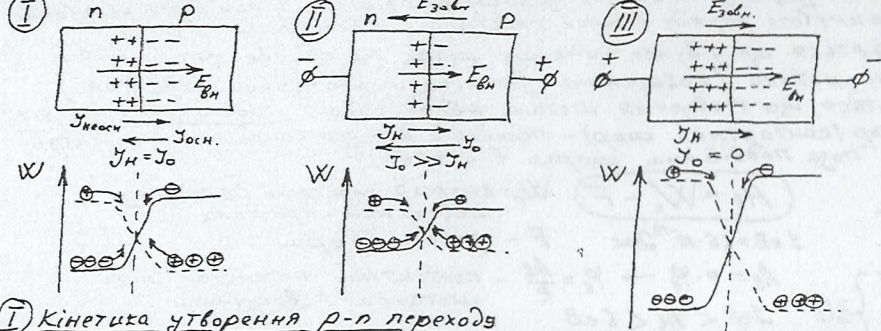
- $p-n-p$ структура



- $n-p-n$ структура

K-55 | Електронно-дірковий перехід (р-п-перехід) -

Контакт двох n/p з різними типами домішкової провідності (контакт неможливо отримати шляхом притискання кристалів)



I Кінетика утворення р-п переходу

Електрони з n-області гасково перейдуть у р-область, а дірки - навпаки внаслідок цього на межі області утвориться об'ємний заряд (n-область $\oplus$, р-область $\ominus$) цей подвійний електричний шар утворить місцеве контактне поле $E_{вн}$, яке перешкоджає дальшому дифундуванню основних носіїв струму (товщина запірного шару 10^{-6} м, для контакту металів 10^{-10} м). $J_{осн} = J_{несн} \approx \mu A$

II $J_{пр}$ - Прямий струм. Якщо до р-п переходу прикласти зовнішнє поле, протилежно до $E_{вн}$, то енергетичний бар'єр знизиться, зросте струм основних носіїв через контакт $J_{осн} \gg J_{несн}$.

III $J_{зв}$ - зворотній струм. Якщо зовнішнє поле $E_{звн}$ збільшить енергетичний бар'єр (до $p \oplus$, до $p \ominus$), то рух основних носіїв через контакт припиниться, існуватиме лише рух неосновних носіїв $J_{несн} = J_{зв} \sim \mu A$

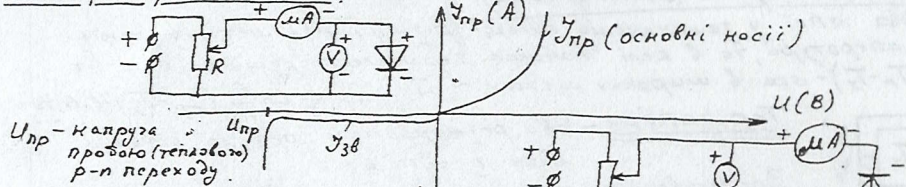
Основна властивість р-п переходу - одностороння провідність (такую властивість має контакт метал - n/p n-типу, якщо $F_{n/p} > F_{метала}$)

- n/p діод - використовується одностороння провідність р-п переходу, або контакту метал - n/p

Діод - одностороння провідність!!!

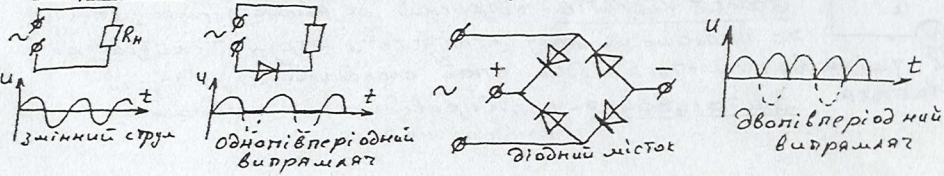


V-A характеристика діода



Застосування діодів:

I Випрямлячі - перетворює змінний струм у постійний



K-36

Максимальний заряд провідника обмежений (отікання зарядів, пробій діелектрика) (гузовий мішок)

C - електроємність (ємність) - величина, що характеризує здатність провідників утримувати заряд електричного поля. $C = \frac{Q}{U}$ електроємність відокремленого провідника $= \frac{Q}{U}$, який треба надати провіднику, щоб його потенціал Φ збільшився на 1 В. $C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}} = 4\pi\epsilon_0 R$ фарада 1 мкФ $= 10^{-6}$ Ф 1 нФ $= 10^{-9}$ Ф 1 пФ $= 10^{-12}$ Ф

Ємність кулі $C_{кулі} = 4\pi\epsilon_0 R$ $C_{землі} = 0,7$ мФ $C_{кулі} = K \frac{Q}{R} \rightarrow C_{кулі} = \frac{Q}{U} = \frac{R}{K} = 4\pi\epsilon_0 R$ в СГСЕ $C = [см]$

Залежить - форма і розміри провідника, оточуючий діелектрик незалежить - Q, Φ , агрегатний стан речовини, хімічний склад, наявність шпорожнин Електроємність відокремленого провідника сильно залежить від наявності і взаємного розташування оточуючих тіл які збільшують C (Ψ)

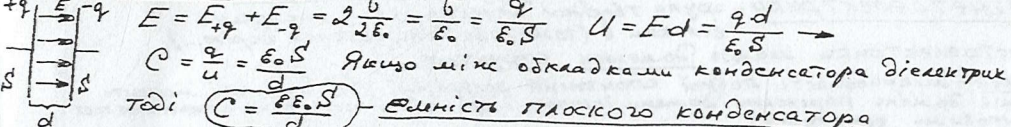
C - конденсатор - система, що складається з двох близько розміщених провідників (обкладки) розділених шаром діелектрика служить для накопичення зарядів. Ел. поле практично повністю зосереджене між обкладками конденсатора, тому: 1. його C не залежить від оточуючих тіл, 2. Заряди на обкладках = за величиною і протилежні за знаком

$C = \frac{Q}{U}$ електроємність конденсатора визначається його формою, розмірами, діелектриком. Q - заряд позитивної обкладки U - напруга між обкладками пробій діелектрика

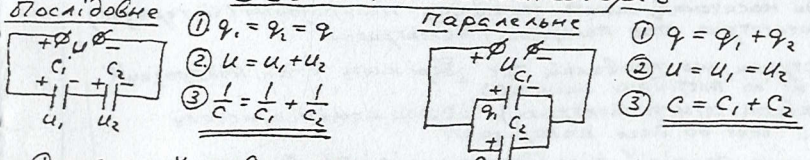
C - постійна C - змінна C - підстроений конденсатор

Типи конденсаторів - по типу діелектрика: повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електронічні При підключенні конденсатора до джерела напруги він заряджається (на обкладках $\pm q$), виникає короткотривалий струм.

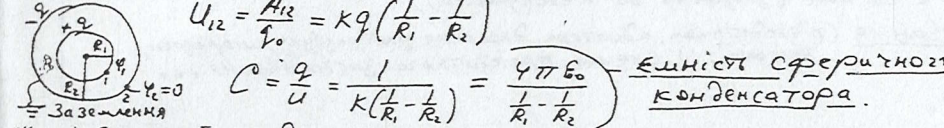
Плоский конденсатор



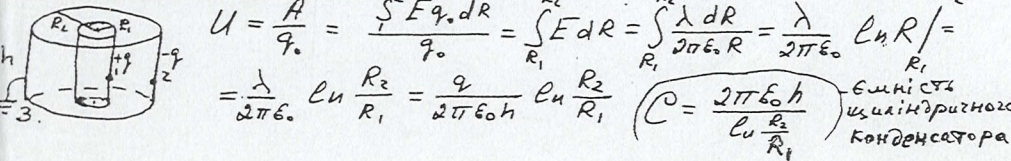
З'єднання конденсаторів



Сферичний конденсатор



Циліндричний конденсатор



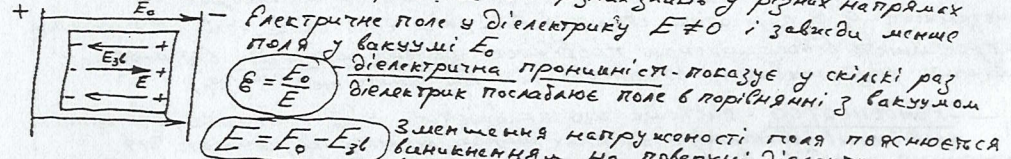
Діелектрики - речовини в яких практично відсутні вільні носії зарядів.

Ізотропні діелектрики - ПОЛЯРНІ $\vec{P} \neq 0$ $\vec{P} = q\vec{l}$ - електричний дипольний момент молекули
НЕПОЛЯРНІ $\vec{P} = 0$

Під дією зовнішнього ел. поля відбувається ПОЛЯРИЗАЦІЯ діелектрика (вимушена) - виникнення електричного дипольного моменту у кожного елемента об'єкта

Механізм поляризації діелектриків

1. НЕПОЛЯРНИХ - поява у молекул індукованих дипольних моментів в напрямку зовнішнього ел. поля, внаслідок зміщення електронних оболонок (електронна поляризація)
2. ПОЛЯРНИХ - поворот дипольних моментів у полі і їх переважна орієнтація вздовж поля (орієнтаційна поляризація)
3. ІОННИХ КРИСТАЛІВ - зміщення решіт. ток іонів різних знаків у різних напрямках



Для ізотропних діелектриків:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon R^2} \quad E = k \frac{q}{\epsilon R^2} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} \quad \varphi = k \frac{q}{\epsilon R} \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ - індукція ел. поля $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \rightarrow \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \rightarrow \vec{P} = (\epsilon - 1) \epsilon_0 \vec{E}$

$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i = n \langle \vec{p} \rangle$ - вектор поляризації - кількісна міра поляризації діелектрика. $\langle \vec{p} \rangle$ - середній дипольний момент молекули

$\int \vec{D} dS = q_{\text{стор.}}$ або $\int E dS = \frac{q_{\text{внутр}}}{\epsilon \epsilon_0}$ - теорема Остроградського - Гаусса для поля в діелектриках

СПОНТАННО (самодовільно) поляризовані діелектрики -

- сегнетоелектрики - група твердих діелектриків з аномально великим ϵ (сегнетова сілі, титанат барю...)

Сегнетоелектрики мають доменну структуру. Домен - мікрообласть повної спонтанної поляризації, всі дипольні моменти атомів домена паралельні. Доменні існують і при відсутності поля (це пояснюється квантовими ефектами).

Властивості сегнетоелектриків: 1. ϵ -величке і $\epsilon = f(E)$ 2. Поляризуються (поворот доменів) до насичення, мають залишкову поляризацію (гістерезис) 3. При $T > T_{\text{Кюри}}$ сегнетоелектрик стає полярним діелектриком

ЕЛЕКТРЕТИ - діелектрики, що тривалий час зберігають стан поляризації (порівняти до постійних магнітів).

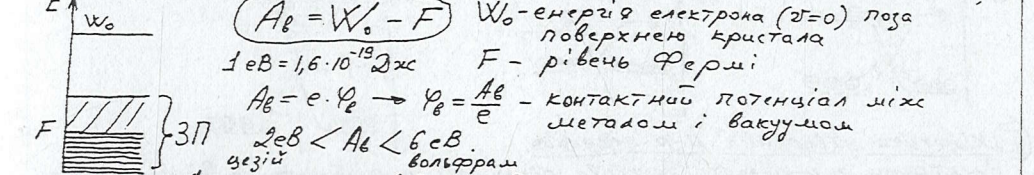
П'ЕЗОЕЛЕКТРИКИ (кварц, сегнетоелектрики) - деформація кристалу у певному напрямі веде до його поляризації

ЕЛЕКТРОСТРИКЦІЯ - зміна розмірів тіла (деформація) при внесенні кристала в ел. поле (зворотне до п'єзоефекту).

Застосування (п'єзодатчик, адаптери, джерела ультразвуку, мікрофон, телефон...) схеми практичного застосування...

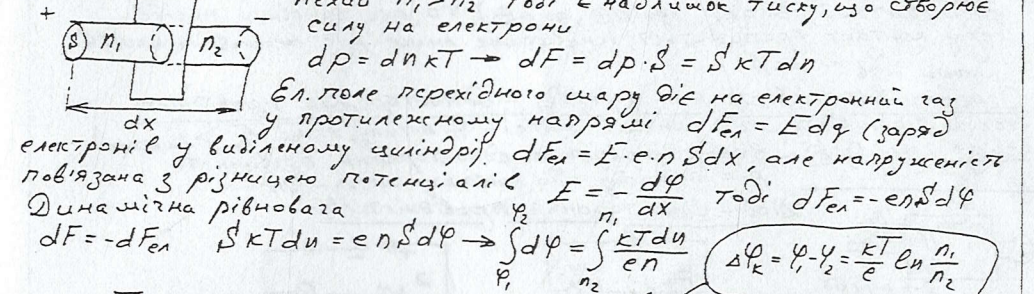
Контактні явища

Ав-робота виходу електрона з металу - робота яку необхідно виконати при віддаленні електрона з металу у вакуум. Ав-виконується проти сил притягання електрона з боку надлишкового позитивного заряду атомних залишків решітки і сил відштовхування при поверхневому заряді вільних електронів (електронна хмара). Проявляється це у дуже тонкому шарі по обидві сторони від поверхні металу (товщиною ~ десятіліка міжatóмних відстаней). Вважається, що поверхня металу являє собою подвійний електричний шар (контактний шар) - подібний досить тонкому конденсатору (ел. поле поза подвійним шаром відсутнє).



$A\varphi$ залежить: від природи кристала, типу решітки, форми і обробки поверхонь, домішок, температури...
 $\Delta\varphi_K$ - контактна різниця потенціалів (Вольта, 1797р) - виникає при контакті різних металів внаслідок дифузії електронів. Законы Вольта 1. $\Delta\varphi_K$ залежить від природи металів і температури спаю. 2. $\Delta\varphi_K$ на кінцях ланцюга різних металів не залежить від природи проміжних ланок і визначається тільки крайніми (для замкнутого кільця $\Delta\varphi_K = 0$) 1. Ряд Вольта $Al, Zn \dots Ag, Au, Pt$.

Розглянемо контакт на основі електронної теорії:



Термоелектрика (явище Зеебека) якщо два спаї у замкнутому кільці різних металів мають різні температури, то в колі виникає термоелектрорушійна сила - вт $\mathcal{E}_T = \alpha (T_F - T_X)$ - яка в широких межах $\sim \Delta T$ $\mathcal{E}_T = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_F - T_X)$ (вивести...)

Термопара - два різних металів спаюваних один з одним.

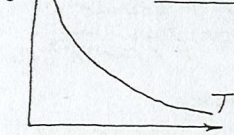
Застосування: термометри, термодатареї - генератори електроенергії ($\eta_{\text{ТТ}} \approx 15-20\%$)

Ефект Пельтье - обернений до явища Зеебека, якщо до описаному колу пропускати струм, температура спаїв змінюватиметься - один спай охолоджується, а другий нагрівається
Застосування - напівпровідникові холодильники, кондиціонери.

K-53

Напівпровідники (Н/п) - широкий клас речовин, які за своєю

провідністю займають проміжне місце між металами і діелектриками ΔE_{33}

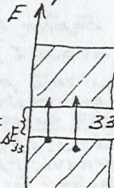
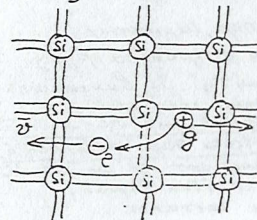


Властивості Н/п: ① їх електропровідність, α отже, і концентрація носіїв струму сильно залежать від зовнішніх впливів (температура, опромінення, домішки...)
② якщо $T \uparrow \rightarrow$ опір різко зменшується
③ електропровідність має електронний механізм.

Н/п: 1 атомарні Ge, Si, C (алмаз) 2. іонні-сульфіди Zn, Pb з молекулярні - SiC, нафталін.

Власна провідність чистих Н/п.

атом кремнія - Si - 4 валентних електрони
зв'язок між атомами - парно-електронний (ковалентний)



З підвищенням T теплові коливання решітки приводять до розриву зв'язків (кТ ΔE_{33} , але є електрони для яких $E > \Delta E_{33}$)
тастина електронів стає вільною (переходять з B3 у B1) на їх місці лишається некомпенсований додатний заряд-вакансія - дірка, яка теж бере участь у механізмі провідності.

Носії струму у Н/п - електрони (провідність n-типу) $n_e = n_{дірок}$
дірки (провідність p-типу)

Дірка - квазітастичка - рухається так, як рухалась би тастика з т.р. і певною масою

Власна провідність чистого Н/п - рух електронів + рух дірок

Регулювання електронів і дірок приводить до встановлення рівноважної концентрації електронів і дірок. Чистий Si $T=300^\circ\text{C}$ $n_e=10^{10}\text{cm}^{-3}$ $T=700^\circ\text{C}$ $n_e=10^{24}\text{cm}^{-3}$

Фоторезистор (фотопір) - опір сильно залежить від освітленості (тастичка світла поглинається валентним електроном, який розриває зв'язок і стає вільним (переходить у зону провідності B1) - внутрішній фотоелект

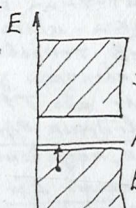
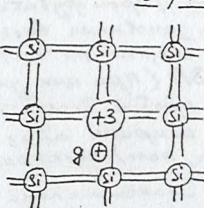
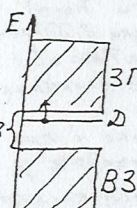
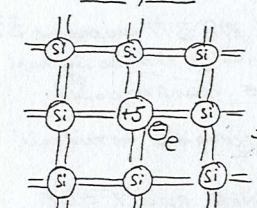
Домішкова провідність Н/п - при внесенні у кристал Н/п 0,001% домішки (заб. 5 валентних атомів) опір зменшується у 100 000 разів

n-типу $\leftarrow$ Кристали Н/п $\rightarrow$ p-типу

⑤ $\leftarrow$ валентність домішки $\rightarrow$ ③

донорна $n_e \gg n_p$ $\leftarrow$ домішка $\rightarrow$ акцепторна $n_p \gg n_e$

електрони $\leftarrow$ основні носії $\rightarrow$ дірки



Наявність домішок веде до появи у забороненій зоні B2 додаткових локальних енергетичних рівнів A і D.

Концентрація домішkových носіїв в Т не залежить.

K-38

W - енергія заряду в ел. полі

$$A_{ел.п.} = q \cdot U = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\varphi_1 - q\varphi_2 = W_1 - W_2$$

$W = q \cdot \varphi$ - потенціальна енергія заряду q в ел. полі = роботі ел. поля по переміщенню заряду q з даної точки поля в точку з $\varphi=0$

$W = q_1 \cdot q_2 / R$ - потенціальна енергія заряду q_1 в полі заряду q_2 - енергія взаємодії двох точкових зарядів

$$W = q_1 \cdot q_2 / R = \frac{1}{2} (q_1 \cdot q_2 / R + q_2 \cdot q_1 / R) = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2)$$

Енергія взаємодії системи точкових зарядів

$$W = W_{12} + W_{13} + W_{23} + \dots = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2 + q_3 \varphi_3 + \dots)$$

φ_1 - потенціал точки де знаходиться заряд q_1
 φ_2 - " " " " " "

$$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i$$
 - енергія системи точкових зарядів

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{C \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$
 - енергія поля відокремленого провідника

Енергія конденсатора

$$W = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2) = \frac{1}{2} q (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{2} q U$$

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$
 - енергія зарядженого конденсатора = енергія ел. поля конденсатора

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 S E^2 d^2}{2d} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 S d = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 V$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$$
 - об'ємна густина енергії ел. поля.

Сили, що діють на діелектрик в ел. полі (електростриктия)

Питання: дія неоднорідного поля на дипольні молекули поляризованого діелектрика (розрахунок сил дуже складний)

Енергетичний спосіб визначення сил - якщо провідники відключені від джерел $q = const$

$$dA = -dW_{q=const}$$
 - робота A всіх внутрішніх сил системи при повільних переміщеннях провідників і діелектриків відбувається тільки за рахунок зменшення ел. енергії системи

Приклад: Визначити силу, що діє на одну з обкладок конденсатора в рідкому діелектрику в.

$$A = F \cdot \Delta x = -\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{q^2}{2C_1} - \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2} \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right) = \frac{q^2}{2} \left(\frac{x}{\epsilon \epsilon_0 S} - \frac{x + \Delta x}{\epsilon \epsilon_0 S} \right) = \frac{q^2}{2 \epsilon \epsilon_0 S} (x - x - \Delta x) = -\frac{q^2 \Delta x}{2 \epsilon \epsilon_0 S} = F \cdot \Delta x \Rightarrow$$

$$F = -\frac{q^2}{2 \epsilon \epsilon_0 S}$$
 - сила, що діє на одну з пластин конденсатора

$$але E = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S} \Rightarrow q = \epsilon \epsilon_0 S E \Rightarrow F = -\frac{\epsilon^2 \epsilon_0^2 E^2 S^2}{2 \epsilon \epsilon_0 S} = -\frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 S$$

$$\frac{F}{S} = F_{од} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$$
 - поверхнева густина сили - електричний тиск

K-39

Електричний струм - упорядкований (направлений) рух електричних зарядів (провідності, конвекційний...)

Струм провідності - створюється рухом вільних зарядів під дією електричного поля

Носії струму - заряди, що створюють ел. струм (метал - електрони, електроліт - іони, H_2 - електрони і дірки, газ - електрони і іони, вакуум - електрони)

Умови існування струму

1. Електричне коло повинно бути замкнутим (складеється тілечко з провідників).
2. У колі має бути джерело струму - пристрій для створення і підтримання, на кінцях кола, різниці потенціалів, з урахунок роботи джерела сил, неелектростатичної природи.

Напрямок струму - напрям руху $\oplus$ зарядів, або напрям протилежний до руху $\ominus$ (від $\oplus$ джерела до $\ominus$).

Найявніші струму виявляють за його дією:

I Магнітна (1820р. Ерстед) - основна дія - завжди

II Хімічна - електроліз - в електролітах

III Теплова - нагрівання провідників (крім надпровідників і вакууму)

Всі дії струму визначаються його фізичними характеристиками:

1. $I = \frac{q}{t}$ $I = \frac{dq}{dt} = q'$ - сила струму $I = q'$, що проходить через переріз провідника за 1с.

$I = [A = \frac{C}{s}]$ 1 ампер ... Амперметр (послідовно, у розрив кола)

2. $j = \frac{I}{S}$ - густина струму (напрямок $\vec{j}$ - напрям струму (руху $\oplus q$)).

$j = [\frac{A}{m^2}]$ $\oint \vec{j} dS = - \frac{dq}{dt}$ - р-ня неперервності - виражає 3.3.3.

Постійний струм - $I = const$ - величина і напрям струму не міняються з часом, і густина струму однакова по всьому перерізу $I = jS$

У колі постійного струму $\frac{j_1}{S_1} = \frac{j_2}{S_2}$

Струм у провіднику = хаотичний + упорядкований рух носіїв

$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q_0 n V}{\Delta t} = \frac{q_0 n V}{\Delta t} = \frac{q_0 n S v \Delta t}{\Delta t} = q_0 n S v$

$j = q_0 n v$ $v = \frac{I}{q_0 n S} \approx 10^{-4} \text{ м/с}$

Закон Ома (нм. 1827р.) - експериментально

$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$ $R = \frac{U}{I}$ $R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{U_1}{I} - \frac{U_2}{I}$ $R = \frac{U}{I}$ $R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{U_1}{I} - \frac{U_2}{I}$

$R = \frac{U}{I}$ - опір провідника - визначає його здатність обмежувати силу струму в колі (опір металів зв'язаний з розсіюванням електронів провідності на теплових коливаннях кристалічної решітки і структурних неоднорідностях)

$R = \frac{\rho L}{S}$ - опір залежить ρ, S - геометрії розміри і форми ρ - питомий опір (визначається матеріалом і його станом) з табл.

$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$ $R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$ α - температурний коефіцієнт опору провідника (метал $\alpha > 0$ електроліт $\alpha < 0$) з табл.

$U = [V]$ $U_{12} = \frac{A_{12}}{q}$ - напруга - рівна роботі, що виконується результируючим полем кулонівських і сторонніх сил, по переміщенню заряду 1 Кл. з т.1 в т.2.

K-52

Причиною ел. опору є стикання електронів з позитивними іонами кристалічної решітки (розсіювання електронів на неоднорідностях густини атомів). При $T \uparrow$, теплові коливання іонів збільшуються, зменшується і розсіювання електронів провідності - зростає провідність

Надпровідність (1911р. Камерлінг-Оннес Hg $T_c \approx 4,2K$) - явище різкого зменшення опору деяких металів (сплавів, сполук) при $T \rightarrow 0$ Ом.м. ($\rho < 10^{-25}$ Ом.м.)

Властивості надпровідників:

1. Ел. струм збуджений у надпровіднику може існувати без джерела (роками)
2. В ретовині у надпровідному стані магн. поле відсутнє (виштовхується з надпровідника - ефект Мейснера)
3. Магнітне поле руйнує стан надпровідності при $B > B_k$ B_k - критичне м.п. залежить від T ($T \uparrow B_k \uparrow$) Надпровідність може бути зруйнована і магн. полем власного струму

Теорія надпровідності (теорія БХШ 1957р. Бардін, Купер, Шріффер) Надпровідність не є властивістю окремих атомів, а є проявом руху і взаємодії всього колективу атомів у кристалічній решітці. Її виникнення зумовлене взаємодією електронів провідності з кристалічною решіткою. Надпровідність - колективний квантовий ефект електронів, що взаємодіють між собою завдяки посередницькій ролі решітки (куперівська пара електронів)

Застосування: БОМ - елементи пам'яті, перемикачі; транспорт на магнітній подушці; трансформатори без феромагнітного осердя і без теплових втрат; космонавтика - магнітний захист від потоків заряджених частинок...

Високотемпературна надпровідність ... !!!

Зонна теорія - квантова теорія електронів, що рухаються у періодичному полі кристалічної решітки.

Енергетична зона - це сукупність реальних станів (10^{23}) близько розташованих підрівнів, які практично зливаються в одну зону

Енергетичні рівні атомів $\rightarrow$ зони кристала

Метали $\Delta E_{33} = 0$ I - перехід електронів між підрівнями незайнятих ЗП

II - перекриття зони провідності і валентної зони.

Незначного впливу зон. поля достатньо, щоб змусити електрон змінювати свій енергетичний стан (дрейфувати проти поля)

Діелектрики - цілком заповнена валентна зона відділена від ЗП широким $\Delta E > 3 \text{ еВ}$, теплової енергії не достатньо ($kT \ll \Delta E$), щоб у слабкому полі перебити електрон у ЗП (при цих умовах діелектрик є ізолятором)

Сильне поле або $T \uparrow$ - пробій діелектрика.

Напівпровідник n ширина ΔE_{33} невелика і при незначній активації (освітлення, нагрівання, поле) електрони переходять у ЗП

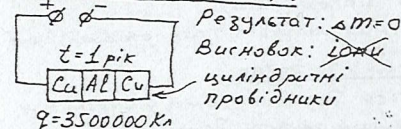
Рівень Фермі E_F - максимальна енергія електронів при $T = 0K$.

При такій температурі електрони послідовно заробляють усі можливі низькі енергетичні рівні аж до найвищого допустимого E_F включно.

Метали - ретовини, які характеризуються високою електро-
провідністю $\sigma = 10^6 - 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$, з підвищенням $T \rightarrow 54 \rightarrow R \uparrow$
 $R = R_0(1 + \alpha T)$

Носії струму

Дослід Рікке (1801р.)



1944р Змінний струм →
Крутильні коливання катушки → $\frac{q}{m}$

Висновок: Носії струму у металах вільні електрони

II Утворення носіїв При збудженні атомів їх зовн. електронні оболонки перекриваються → валентні електрони усуваються в кристал металу: просторова решітка з $\oplus$ іонів, яка заперена в "хмарку" електронів провідності (вільних). "Хмарка" не дає силам відштовхування зривати решітку, і визначає високу електро і теплопровідність металів

Класична електронна теорія металів (Друде 1900р, Лоренц 1905р.)

- Основи:
- Метал - система іонів (решітка) + вільні електрони
 - Електронний газ - ідеальний (електрони взаємодіють тільки з решіткою).
 - Цей газ підлягає законам і закону про рівномірний розподіл енергії по ступеням вільності ($\frac{1}{2} kT$) $\frac{m \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ $\bar{v}^2$ - середня квадратична швидкість теплового руху електронів
 - Якщо $E_{зовн} = 0$ рух хаотичний, якщо $E_{зовн} \neq 0$ рух хаотичний + дрейф (напрявлений)
 - Електрон набуває енергії упорядкованого руху під дією $E_{зовн}$ на шляху вільного пробігу (λ - середній довжина вільного пробігу $\approx$ періоду кристал. решітки) Під час зіткнення е з іонами, ел. віддає свою енергію "дрейфу" іону, внаслідок чого виділяється теплота Джоуля - Ленца.

З-н Ома. Нехай $\bar{v}$ - середня швидкість упорядкованого руху електронів, тоді $j = \frac{e n \bar{v}}{\bar{v}} = e n \bar{v}$ n - концентрація електронів a - прискорення електронів $\bar{v} = \frac{a \bar{t}}{2}$ $\bar{t}$ - середній час вільного пробігу

$\bar{v} = \frac{0 + v_{max}}{2}$ але $v_{max} = a \bar{t}$, $a = \frac{F_{ел}}{m} = \frac{e E}{m}$ $\bar{t} = \frac{\lambda}{\bar{v}}$ тоді

$$j = e n \frac{v_{max}}{2} = e n \frac{a \bar{t}}{2} = e n \frac{e E \lambda}{2 m \bar{v}} \Rightarrow j = \frac{1}{2} \frac{n e^2 \lambda}{m \bar{v}} E = \sigma E$$

З-н Ома у диф. формі

де $\sigma = \frac{1}{2} \frac{n e^2 \lambda}{m \bar{v}}$ - питома провідність металу, але $\bar{v} = \sqrt{\frac{3 E T}{m}} \Rightarrow \sigma \sim \sqrt{T} \Rightarrow \rho \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$ від T , або $\rho \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$

З-н Джоуля - Ленца ω - питома теплова потужність

$\omega = \frac{Q}{V \cdot \Delta t} = n \cdot \bar{v} \cdot W_k$ але $\bar{v} = \frac{1}{2} \frac{v_{max}}{\lambda} = \frac{v_{max}}{2 \lambda}$ - частота зіткнень електронів.

$W_k = \frac{m \bar{v}_{max}^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{e E \lambda}{m \bar{v}} \right)^2 = \frac{e^2 E^2 \lambda^2}{2 m \bar{v}^2}$

$\omega = n \bar{v} \frac{e^2 E^2 \lambda^2}{2 m \bar{v}^2} \Rightarrow \omega = \frac{1}{2} \frac{n e^2 \lambda}{m \bar{v}} E^2 = \sigma E^2$ З-н Джоуля - Ленца у диф. формі

Таким чином, електронна теорія пояснює: з-н Ома, з-н Джоуля - Ленца, взаємозв'язок між електро і теплопровідністю, якісно пояснює залежність опору від T , встановлює зв'язок між σ і параметрами електрон. газу.

Недоліки теорії: ① не може пояснити залежності ρ від T (її експеримент. спостереження для широкого інтервалу температур $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$)

② не пояснює існування надпровідності

③ значні розбіжності у розрахунку теплоємності металів експеримент $C = 3R$ (теорія $C = \frac{3}{2} R = 3R + \frac{3}{2} R$ де $3R$ - теплоємність решітки $\frac{3}{2} R$ - теплоємн. сл. газу.)

④ Розходження у розрахунках λ

З-н Ома для ділянки кола (диференціальна форма)

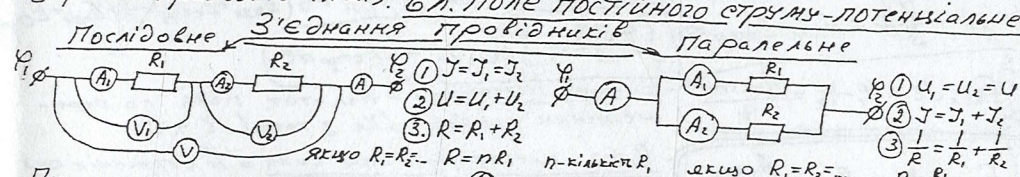
$J = \frac{U}{R}$ або $J = \Lambda U$ де $\Lambda = \frac{1}{R}$ - провідність провідності $\Lambda = [0.1 \cdot \text{м}]$ - сіменс

$R = \rho \frac{l}{S}$ або $\Lambda = \frac{S}{\rho l}$ де $\sigma = \frac{1}{\rho}$ $[0.1 \cdot \text{м}]$ - питома провідність ретовини

$J = \sigma \frac{U}{l} \Rightarrow \frac{J}{\sigma} = j = \sigma \frac{U}{l} = \sigma E$ $(j = \sigma E)$ З-н Ома у диф. формі - встановлює зв'язок між параметрами струму і ділянки кола

① Якщо $J = \text{const}$, то заряд в середині однорідного провідника всюди $= 0$
 $J = \oint \sigma E dS = \frac{dQ}{dt} = 0 \Rightarrow \oint \sigma E dS = 0 = \frac{Q_{внутр}}{\epsilon_0}$ $Q_{внутр} = 0$
Теор. Гаусса

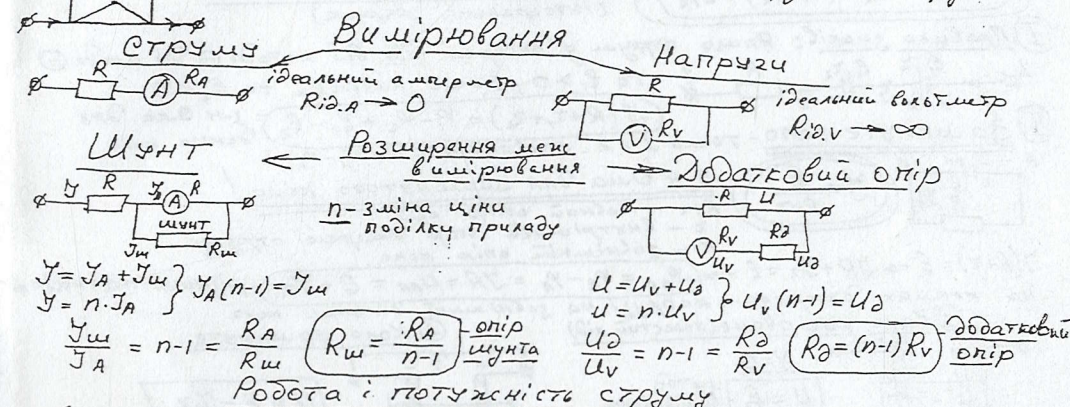
② При протіканні струму на поверхні провідника виникає надишкови заряд, це означає, що навколо провідника є нормальна складова E_n ел. поля. Результуюче поле напрямлене під деяким кутом α . Якщо струм постійний, розподіл зарядів в провіднику не міняється в часі (на місці одних зарядів приходять інші). Ел. поле постійного струму - потенціальне



При розрахунку опору кола: ① виходять з симетрії кола, знаходять точки з однаковим потенціалом які можна з'єднати між собою - це спрощує розрахунки

Т. O_1, O_2, O_3 - мають однаковий потенціал і їх можна з'єднати

② у вузлах провідники можна роз'єднати, так щоб зберіглась симетрія і не порушився струм



Робота і потужність струму

$A = q \cdot U = U \cdot J \cdot t = J^2 R t = \frac{U^2}{R} t$ - робота струму

$P = \frac{A}{t} = U \cdot J = J^2 R = \frac{U^2}{R}$ - потужність струму.

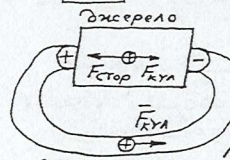
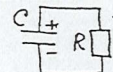
$Q = J^2 R t$ З-н Джоуля - Ленца...

$P = J^2 R$ або $Q = J^2 R t = J^2 \frac{\rho l}{S} t = j^2 \frac{S^2 \rho l}{S} t = j^2 \rho S l t = j^2 \rho V t$

Питома теплова потужність $\omega = \frac{Q}{V \cdot t} = j^2 \rho = j \cdot E = \sigma \cdot E^2$ З-н Джоуля - Ленца у диференціальній формі

K-41

Е.Р.С. - електрорушійна сила



Електростатичне поле кулонівських сил $E_{кул}$ переміщує заряди так, що різниця потенціалів на кінцях провідника зменшується. Для отримання $J = const$ повинні діяти неелектростатичні сили - сторонні сили (джерело струму), які не з'єднують різної менні заряди, а навпаки їх роз'єднують і підтримують різницю потенціалів на кінцях провідника. Сторонні сили створюють ел. поле сторонніх сил $E_{стор}$, яке існує в середині джерела і за рахунок якого ел. заряди рухаються в середині джерела (внутрішня ділянка кола) проти сил ел. стат. поля $E_{кул}$, а на кінцях зовнішньої ділянки кола протікає різниця потенціалів. За рахунок енергії джерела виконується робота, що необхідно для підтримання вторядкованого руху зарядів (індукційний генератор - за рахунок механічної енергії - сила Лоренца; гальванічний елемент - енергія хімічних реакцій - сили молекулярної взаємодії).

Узагальнений 3-н Ома

Якщо ділянка кола містить джерело, то напруженість результуючого поля в провіднику $E = E_{кул} + E_{стор}$ тоді $j = \sigma E = \sigma(E_{кул} + E_{стор}) = \frac{1}{\rho}(E_{кул} + E_{стор})$

$$\int j \rho dl = \int \sigma E dl = \int \sigma E_{кул} dl + \int \sigma E_{стор} dl$$

$$\int E_{кул} dl = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{ел. стат.}}{q}$$

різниця потенціалів = Аел. стат. поля по переміщенню заряду +1 Кл з т.1 в т.2.

$$\int E_{стор} dl = \varepsilon_{12} = \frac{A_{стор}}{q}$$

Е.Р.С. - електрорушійна сила = А сторонніх сил по переміщенню заряду +1 Кл з т.1 в т.2.

$$\int j \rho dl = j R_{12} = U_{12} = \frac{A_{кул} + A_{стор}}{q}$$

Напруга (спад напруги) = Акул + Астор по переміщенню заряду +1 Кл з т.1 в т.2.

$$j R_{12} = U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}$$

Узагальнений 3-н Ома (інтегральна форма)

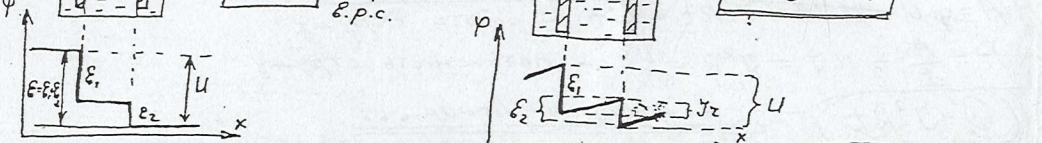
I Правило знаків: Якщо струм у джерелі йде від катода ⊖ до анода ⊕ то $\varepsilon_1 > 0$, якщо навпаки то $\varepsilon_2 < 0$

II Замкнуте коло - точки 1 і 2 співпадають $\rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = 0$

$$j(R + r) = \varepsilon \rightarrow jR + jr = \varepsilon \rightarrow \Delta \varphi_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = jR = U_{BA} = \varepsilon - j r$$

різниця потенціалів на клеммах джерела = напруга на зовнішній ділянці кола

1 Коло розірване (холостий хід) 2 Коло замкнуте



3. Коротке замикання (к.з.) $R \rightarrow 0$ $U \rightarrow 0$ $j_{max} = j_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}$ - струм к.з. - max j джерела.

K-50

Застосування феромагнетиків.

I Магніт - м'які матеріали намагнічуються до насичення навіть у слабких м. полях (переважно за рахунок змивання меж доменів) - мала коерцитивна сила B_k (вузька петля гістерезиса)

Для виготовлення: магнітопроводів електричних машин, трансформаторів, дроселів (на малих частотах)

II Магніт - тверді матеріали - намагнічуються до насичення у сильних м. полях (переважно за рахунок обертання намагніченості доменів) - велика коерцитивна сила (широка петля гістерезиса)

Для виготовлення постійних магнітів

III Магнітострикція - зміна форми і розмірів тіла при намагніченні

Для виготовлення генераторів звукових і устаткування коливальне.

IV Електромагніт V Електромагнітне реле VI Телефон



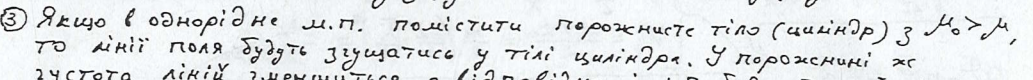
VII Магнітний запис звуку VIII Прилади електромагнітної системи вимірювання нерухокої катушки і сталого осердя

IX Прилади електродинамічної системи вимірювання нерухокої і рухокої катушок.

X Мікрофон - перетворює механічні коливання в електричні. В основі роботи - явище електромагнітної індукції - у провіднику, що рухається в м.п. виникає індукційний струм.

XI Магнітний захист (екранування)

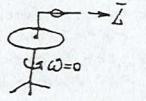
1 2 Роговина в м.п.



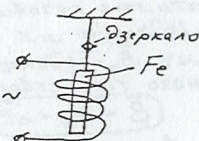
3 Якщо в однорідне м.п. помістити порожнє тіло (циліндр) з $\mu_0 > \mu$, то лінії поля будуть згущатися у тілі циліндра. У порожнині ж густота ліній зменшиться, а відповідно і м.п. буде послаблене. На цьому і ґрунтується побудова магнітного (статичного) захисту. Таким чином можна послабити поле у тисячі разів, але не знищити повністю (на відміну від електричного).

Магніто механічне явище - виникнення обертання тіла при намагніченні

Уявлення про те, що молекулярними струмами є руху електронів атома, приводять до висновку, що всяка зміна намагніченні ретовими повинна супроводжуватись певними механічними явищами. Так як $\vec{p} = \frac{e\hbar}{2m} \vec{S}$ для об'єму ΔV механічний момент імпульса $\vec{L} = \sum \vec{L}_0$ магнітний момент $\sum \vec{p}_m$ але намагніченість $\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} \rightarrow \vec{J} \Delta V = \vec{p}_m$ тоді $\vec{L} = \frac{\vec{p}_m \Delta V}{\vec{J}}$



Аналогом магніто механічного явища є досвід на лаві Жуковського



Досвід Бінштейна-де Гааза (1915р) - залізний циліндр намагнічували - він починав повертатись - а-вищиробалося. При зміні напрямку поля - змінювався напрям повороту. З $\omega \rightarrow \omega$ - дуже мале. Для підсилення ефекту використовували резонанс: частоту крутильних коливань циліндра робили рівною частоті струму (намагнічують)

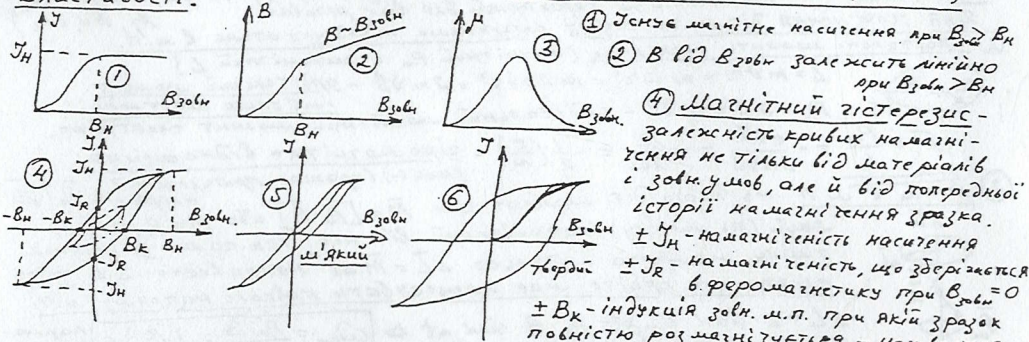
Механомагнітне явище - намагнічення при обертанні (досвід Барнетта)

Результат досліду: для феромагнетиків $\vec{G} = -\frac{e}{2m} \vec{S}$ а не $\vec{G} = -\frac{e}{m} \vec{S}$

Висновок: 1) В атомі окрім орбітального руху електрона є і інший тип руху, що приводить до виникнення магнітного і механічного моментів. 2) Електрон, як елементарна частинка, характеризується своїм зарядом, масою, магнітним і механічним моментами - спінові моменти

III Феромагнетики $\mu = 10^3 - 10^6$ - ретовими, які можуть володіти спонтанною (самодовільною) намагніченістю, тобто намагнічені при відсутності зовн. м.п. - Fe, Co, Ni і їхні сплави (тілкі кристали)

Властивості:



5) B_k - мале - магніто-м'які матеріали 6) B_k велике - магніто-тверді матеріали

7) Точка (температура) Кюрі - температура, при якій тепловий рух руйнує області спонтанної намагніченості - доменів. $T_k(Fe) = 1063K$ $T_k(Ni) = 623K$ при $T > T_k$ ретовина стає парамагнетиком

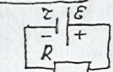
Теорію феромагнетиків вдалося зрозуміти тільки за допомогою квантової механіки. При певних умовах у кристалах виникають так звані одніні сили які заставляють спінові магнітні моменти електронів встановлюватись паралельно друг до друку. Виникають області (1-10мкм) спонтанного (самодовільного) намагнічення - доменів. У межах домена феромагнетик намагнічен до насичення.

Намагнічення феромагнетиків у напрямі зовнішнього поля:

- Зміщення доменів (ті доменів, що орієнтовані по полю - ростуть) цьому перешкоджають дислокації, дефекти решітки, домішки, мікродіріжчини...
- Процес обертання - поворот вектора намагніченості домена у напрямі поля

IV Антиферомагнетики... V Феромагнетики...

К.К.Д. споживатів і джерел струму



1) $P_R = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R = \left(\frac{E}{R+r}\right)^2 R$ потужність у зовнішній ділянці (корисна) кола (корисна) Потужність у зовнішній ділянці кола буде макимальною при умові $\frac{dP_R}{dR} = 0 \Rightarrow R = r$ - умова макс P_R

2) $P_2 = I^2 r$ - втрачена потужність на виділення тепла в джерелі струму

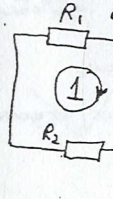
3) $P = I^2 R + I^2 r = \frac{E^2}{R+r}$ - повна потужність джерела

$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{R}{R+r}$ - К.К.Д. джерела струму або $\eta = \frac{E - Ir}{E} = 1 - \frac{Ir}{E}$ так як $U \leq E$ то $\eta \leq 1$

але $P_R = UI = (E - Ir)I = EI - I^2 r$ { $I = 0$ при $I = 0$ - коло розірване $I = \frac{E}{R+r}$ при $I = \frac{E}{R+r}$ - к.з. (вся енергія виділяється у джерелі - жак!)

Завдання. Побудувати графіки $P_R \sim I$, $P \sim I$, $\eta \sim I$...

Правила Кірхгофа (нім. 1845р.)

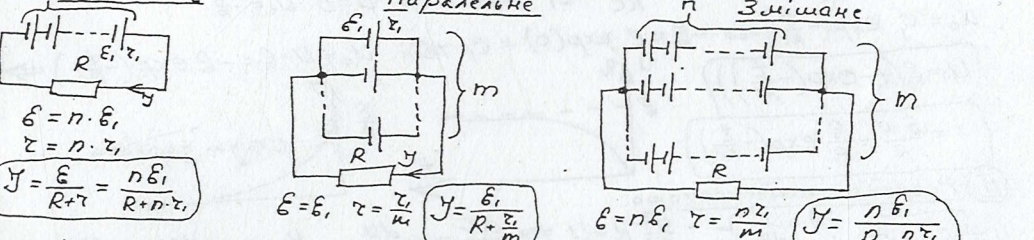


I $\sum I = 0$ - Алгебраїчна сума струмів, що сходяться у будь-якому вузлі, дорівнює нулю. (кількість незалежних вузлових рівнянь $[D-1]$ n -кількість вузлів) II $\sum I R + \sum I r = \sum E$ - Обов'язково на схемі позначити напрямки струмів! Т.А. $I_3 = I_1 + I_2$ Т.В. $I_1 + I_2 + I_4 = I_5$

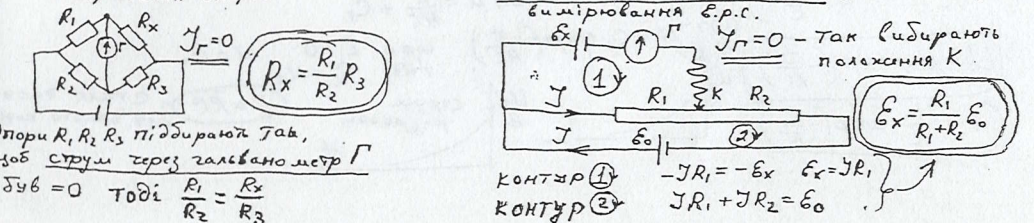
Алгебраїчна сума добутоків сил струмів на опори дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил у цьому контурі.

- Виділяють найбільш прості контури (з мінімумом джерел і опорів), так, щоб у наступному контурі містилась хоч одна нова вітка.
- Обхід всіх контурів треба здійснити в одному напрямі (найчастіше за годинниковою стрілкою).
- $I > 0$ якщо напрям струму збігається з напрямом обходу контура.
- $E > 0$ якщо її власний струм збігається з напрямом обходу контура.
- Контурів (рівнянь) пишуть стільки, щоб охопити всі в.р.с. і опори кола.
- Якщо при розв'язуванні рівнянь вийшло $I < 0$ це означає, що дійсний напрям струму протилежний до обраного.

З'єднання джерел струму (однакові)



Місток Уїтстона - вимірювання опорів



Опори R_1, R_2, R_3 підбирають так, щоб струм через гальванометр G був $= 0$ тоді $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

K-43 Закон збереження енергії для ел. поля.

I Потенціали провідників не змінюються (провідники під'єднані до джерела струму).
 $\sum \mathcal{E} dq = \sum \mathcal{E} q dt = dA + dW + \sum \int R dt$ З.З.Е - Сумарна робота всіх джерел струму = механічній роботі сил електричного поля + зміна потенціальної енергії ел. поля елементів кола + тепло в джерелі-ленті.

Визначити F_{00} - силу дії ел. поля на 1 м^2 поверхні рідини. Вважаємо, що рівень рідини збільшився на dh тоді З.З.Е. $\mathcal{E} dq = dA + dW$ вважаємо віпр провідників $R \rightarrow 0$ тому $\int R dt = 0$, $dA = F_{00} S dh$ - мех. робота сил ел. поля $dW = W_2 - W_1 = (\frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2) S dh$ - зміна енергії ел. поля конденсатора.

Робота джерела $\mathcal{E} dq = U dq = U \cdot dC \cdot U = U (\epsilon \epsilon_0 dS - \epsilon_0 dS) U = U (\epsilon \epsilon_0 - \epsilon_0) U dS = d(\epsilon \epsilon_0 E^2 - \epsilon_0 E^2) S dh = (\epsilon \epsilon_0 E^2 - \epsilon_0 E^2) S dh$ (з-площа поверхні рідини між обкладками а - ширина пластини) тоді $(\epsilon \epsilon_0 E^2 - \epsilon_0 E^2) S dh = F_{00} S dh + (\frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2) S dh \Rightarrow F_{00} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ Сила, що діє на одиницю поверхні рідини рівна різниці густин енергії ел. поля з обох сторін поверхні рідини (різниця ел. тисків).

II Заряди провідників не змінюються (провідники ізолювані). З.З.Е. $0 = dA + dW + dQ$ де $dQ = \sum \int R dt$ - кількість теплоти $-dW = dA + dQ$ - зменшення потенціальної енергії ел. поля йде на виконання мех. роботи силами ел. поля + тепло в джерелі-ленті.

Квазістаціонарні струми - струми, що повільно змінюються (підкоряються законам постійного струму).
 I Зарядка конденсатора. R - повний опір кола. За II правилом Кірхгофа $R \cdot i + U = \mathcal{E}$ і - миттєва зміна струму i - миттєва напруга на C $i = \frac{dq}{dt}$ $U = \frac{q}{C}$ тоді $R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} - \mathcal{E} = 0$ $\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} - \frac{\mathcal{E}}{R} = 0$ але $\frac{dq}{C} = dU$ $\frac{q}{C} = U$ тоді $\frac{dU}{dt} + \frac{U}{RC} - \frac{\mathcal{E}}{RC} = 0$ введемо нову змінну: $U_0 = U - \mathcal{E}$ тоді $\frac{dU_0}{dt} + \frac{U_0}{RC} = 0 \Rightarrow \frac{dU_0}{U_0} = -\frac{dt}{RC}$ проінтегруємо цей вираз $\int \frac{dU_0}{U_0} = -\int \frac{dt}{RC} \Rightarrow \ln U_0 = -\frac{t}{RC} + C_1$ при $t=0$ $U=0$ $U_0 = -\mathcal{E}$ $U_0 = C_1 \exp(-\frac{t}{RC}) \Rightarrow -\mathcal{E} = C_1 \exp(0) = C_1$ тоді $U_0 = U - \mathcal{E} = -\mathcal{E} \exp(-\frac{t}{RC}) \Rightarrow U = \mathcal{E}(1 - \exp(-\frac{t}{RC}))$ $i = \frac{\mathcal{E} - U}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \exp(-\frac{t}{RC})$

II Розрядка конденсатора. $U_0 = \frac{q}{C}$ $iR = U$ $i = -\frac{dq}{dt}$ $U = \frac{q}{C}$ $U_0 = \frac{q}{C}$ $- \frac{dq}{dt} R = U \Rightarrow \frac{dq}{dt} = -\frac{U}{R} = -\frac{q}{RC} \Rightarrow \frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}$ проінтегруємо $\ln U = -\frac{t}{RC} + C_1$ або $U = C_1 \exp(-\frac{t}{RC})$ при $t=0$ $U = U_0$ тоді $C_1 = U_0$ $U = U_0 \exp(-\frac{t}{RC})$ $i = \frac{U_0}{R} \exp(-\frac{t}{RC})$

Графіки: U та i в часі. U зростає від 0 до $\mathcal{E}$, i зменшується від $\frac{\mathcal{E}}{R}$ до 0.

З.З.Е. $\mathcal{E} dq = dA + dW + dQ$ де $dQ = \sum \int R dt$ - кількість теплоти $-dW = dA + dQ$ - зменшення потенціальної енергії ел. поля йде на виконання мех. роботи силами ел. поля + тепло в джерелі-ленті.

Квазістаціонарні струми - струми, що повільно змінюються (підкоряються законам постійного струму).
 I Зарядка конденсатора. R - повний опір кола. За II правилом Кірхгофа $R \cdot i + U = \mathcal{E}$ і - миттєва зміна струму i - миттєва напруга на C $i = \frac{dq}{dt}$ $U = \frac{q}{C}$ тоді $R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} - \mathcal{E} = 0$ $\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} - \frac{\mathcal{E}}{R} = 0$ але $\frac{dq}{C} = dU$ $\frac{q}{C} = U$ тоді $\frac{dU}{dt} + \frac{U}{RC} - \frac{\mathcal{E}}{RC} = 0$ введемо нову змінну: $U_0 = U - \mathcal{E}$ тоді $\frac{dU_0}{dt} + \frac{U_0}{RC} = 0 \Rightarrow \frac{dU_0}{U_0} = -\frac{dt}{RC}$ проінтегруємо цей вираз $\int \frac{dU_0}{U_0} = -\int \frac{dt}{RC} \Rightarrow \ln U_0 = -\frac{t}{RC} + C_1$ при $t=0$ $U=0$ $U_0 = -\mathcal{E}$ $U_0 = C_1 \exp(-\frac{t}{RC}) \Rightarrow -\mathcal{E} = C_1 \exp(0) = C_1$ тоді $U_0 = U - \mathcal{E} = -\mathcal{E} \exp(-\frac{t}{RC}) \Rightarrow U = \mathcal{E}(1 - \exp(-\frac{t}{RC}))$ $i = \frac{\mathcal{E} - U}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \exp(-\frac{t}{RC})$

II Розрядка конденсатора. $U_0 = \frac{q}{C}$ $iR = U$ $i = -\frac{dq}{dt}$ $U = \frac{q}{C}$ $U_0 = \frac{q}{C}$ $- \frac{dq}{dt} R = U \Rightarrow \frac{dq}{dt} = -\frac{U}{R} = -\frac{q}{RC} \Rightarrow \frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}$ проінтегруємо $\ln U = -\frac{t}{RC} + C_1$ або $U = C_1 \exp(-\frac{t}{RC})$ при $t=0$ $U = U_0$ тоді $C_1 = U_0$ $U = U_0 \exp(-\frac{t}{RC})$ $i = \frac{U_0}{R} \exp(-\frac{t}{RC})$

Графіки: U та i в часі. U зростає від 0 до $\mathcal{E}$, i зменшується від $\frac{\mathcal{E}}{R}$ до 0.

З.З.Е. $\mathcal{E} dq = dA + dW + dQ$ де $dQ = \sum \int R dt$ - кількість теплоти $-dW = dA + dQ$ - зменшення потенціальної енергії ел. поля йде на виконання мех. роботи силами ел. поля + тепло в джерелі-ленті.

K-48 Магнетики-реговини, здатні у зовнішньому м.п. намагнітуватися - створювати власне м.п.

Ідея Ампера-магнетизм реговин пояснюється наявністю мікро-скріпінних електричних струмів (молекулярних струмів), рівномірно роз-поділених у всьому об'ємі реговини.

За сучасними уявленнями магнітні властивості зумовлені:
 1) орбітальним магнітним моментом електронів, який виникає внаслідок їхніх рухів навколо ядер
 2) спіновим магнітним моментом електронів
 3) спіновим магнітним моментом ядер. Магнітні поля, збуджувані цими причинами, еквівалентні відповідним полям струмів, які протікають в атомах реговини. Ці струми називають молекулярними. В-індукцію м.п. в реговині визначають за принципом суперпозиції, як суму B_0 - індукції зовнішнього м.п. у вакуумі і ΔB - індукції м.п. намагні-теного тіла, створеного молекулярними струмами (мікроструми) $B = B_0 + \Delta B$ $B_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum R_m$ $\Delta B = \mu_0 J$

J - вектор намагніченості - характеристика намагніченості однорідного магнетика дорівнює магнітному моменту одиниці його об'єму $J = \frac{\sum R_m}{\Delta V}$ або $J = n \cdot \langle R_m \rangle$ де $\langle R_m \rangle$ - середній магнітний момент молекулярних струмів одиниці об'єму

тоді: $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum R_m + \mu_0 J \Rightarrow \oint B d\ell = \mu_0 J$ n - концентрація молекул теорема про циркуляцію

де $\mu = \frac{B}{B_0}$ - магнітна проникність середовища. I Діамагнетики $\mu < 1$ - намагнітяться проти зовн. м.п. $B \uparrow \Delta B$ $B = B_0 + \Delta B$ $\Delta B < 0$ $B < B_0$ реговини у яких магнітні моменти молекул $R_m = 0$ при відсутності зовнішнього м.п.

Діамагнетики - реговини з повністю заповненими електрон-ними оболонками (інертні гази, H_2 , N_2 , повітря, вугілля, H_2O , діамагнетизм характерний для всіх реговин. Ag , Al , Co , O_2).

II Парамагнетики $\mu > 1$ - реговини, атоми яких, при відсутності зовнішнього м.п. мають додатковий рух навколо напрямку м.п. При відсутності зовнішнього м.п. $\sum R_m = 0$ внаслідок теплового руху. Якщо $B_{зовн.} \neq 0$ на атомах діє момент сил який впорядковує розташування атомів-реговини намагнітується $B = B_0 + \Delta B \Rightarrow \mu > 1$

Діамагнетики - реговини з повністю заповненими електрон-ними оболонками (інертні гази, H_2 , N_2 , повітря, вугілля, H_2O , діамагнетизм характерний для всіх реговин. Ag , Al , Co , O_2).

1) Орбітальні моменти електронів (магнітний R_m і механічний L) $L = mvr = m \omega r^2 = m 2\pi \nu r^2 = 2m \nu S$ - орбітальний момент імпульсу електрона $R_m = J \cdot S = -e \nu S$ - орбітальний магнітний момент електрона. $J = \frac{R_m}{L} = \frac{-e \nu S}{2m \nu S} = -\frac{e}{2m} = -\frac{1}{2} (\frac{e}{m})$ - гіромагнітне відношення знак (-) виражає протилежність напрямків R_m і L

2) Атом і м.п. на нього діє момент сил $M = [R_m, B]$ або $M = R_m \cdot B \cdot \sin \alpha$ який (по малюнку) направлений від нас, так само за законом змін моменту імпульсу $\Delta L = M \cdot \Delta t$ направлено ΔL , тобто електронна орбіта має протікати навколо напрямку м.п.

$\Delta L = L \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \varphi = R_m \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot \Delta t \Rightarrow \omega_{пр} = \frac{R_m \cdot B}{L} = \frac{1}{2} (\frac{e}{m}) B$ Лармо-кутова швидкість прецесії електрона $\Rightarrow$ $\omega_{пр} = \frac{1}{2} (\frac{e}{m}) B$ рівня прецесії

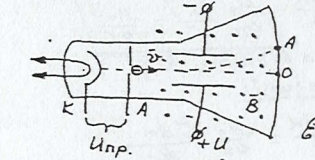
Тільки до його прецесії, тобто додаткового руху навколо напрямку м.п. Висновки: додатковий рух електрона створює додаткове м.п. ΔB , яке направлено протилежно до зовнішнього $B \uparrow \Delta B$ - реговини намагнітується $B = B_0 + \Delta B \Rightarrow \mu > 1$

II Парамагнетики $\mu > 1$ - реговини, атоми яких, при відсутності зовнішнього м.п. мають постійний магнітний момент $R_m \neq 0$ (O_2 , Al , Pt , Fe , Cl_3 ...).

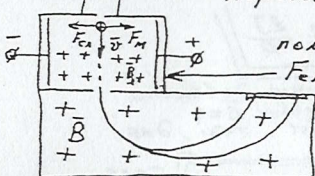
При відсутності зовнішнього м.п. $\sum R_m = 0$ внаслідок теплового руху. Якщо $B_{зовн.} \neq 0$ на атомах діє момент сил який впорядковує розташування атомів-реговини намагнітується $B = B_0 + \Delta B$ $\Delta B > 0$

Графіки: U та i в часі. U зростає від 0 до $\mathcal{E}$, i зменшується від $\frac{\mathcal{E}}{R}$ до 0.

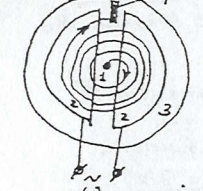
I Визначення питомого заряду електрона $\frac{e}{m}$
Метод Томсона - ґрунтується на компенсації дії однорідних електр. і магнітного полів на рухомий потік електронів в електронно-променевій трубі. Під дією тіллки м.п. світня тгкка змїнується з т.о в т.а. Напругу на відхиляютих пластинах підбирають так, щоб скопенсувати дію магн. поля $F_{\text{м.п.}} = F_{\text{ел.}} \rightarrow e v B = e E \rightarrow v = \frac{E}{B}$
 d - відстань між відхиляютими пластинами.
Електрони розганяються прискорюючою напругою $U_{\text{пр}}$
 $e U_{\text{пр}} = \frac{m v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 e U_{\text{пр}}}{m}}$ тоді $\frac{U}{B d} = \sqrt{\frac{2 e U_{\text{пр}}}{m}} \Rightarrow \left(\frac{e}{m} = \frac{U^2}{2 U_{\text{пр}} B^2 d^2} \right) \frac{e}{m} = \dots$



II. Мас-спектрограф (англ. Дж. Дж. Томсон 1910р.) - основний метод одержання інформації про маси ядер і атомів, відкриття ізоотопів і вивчення ізоотопного складу елементів. (Ретовина нагрівається, переводиться у газоподібний стан, іонізується, формуються пучок який під дією електричного і магнітного полів розділяється ~ m.

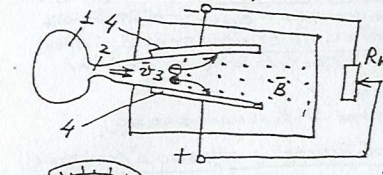


III. Прискорювачі заряджених частинок - призначені для одержання заряджених частинок (електронів, протонів, ядер, іонів тощо) великих енергій за допомогою прискорення в електр. полях.

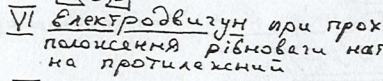


- Циклічні прискорювачі: 1. Дикрало іонів, протонів, електронів...
2. Дуанти з вакуумна камера 4 Мішеня
Циклотрон ($\omega = \text{const}$) (амер. Лоуренс 1932р.)
Синхротрон ($\omega \neq \text{const}$) електрони
Фазотрон ($\omega \neq \text{const}$) протони, ядра, іони
Синхрофазотрон ($\omega \neq \text{const}$) протони 500 Гев.

IV МГД-генератор - магнітогидродинамічний генератор-установка для безпосереднього перетворення теплової енергії в електричну. Розділення зарядів відбувається під дією сили Лоренца (стариння F)



1. Камера (паливо переходить у газ - іонізується)
2. Канал ($v = 1000 - 2500 \text{ м/с}$) 3. МГД - канал по якому рухається плазма або провідна рідина. 4. електроди на які попадають іонізовані частинки різних знаків Енга ~ 500В.
Прилади магнітоелектричної системи
Момент сил, що діє на рамку із струмом ~ J вращає

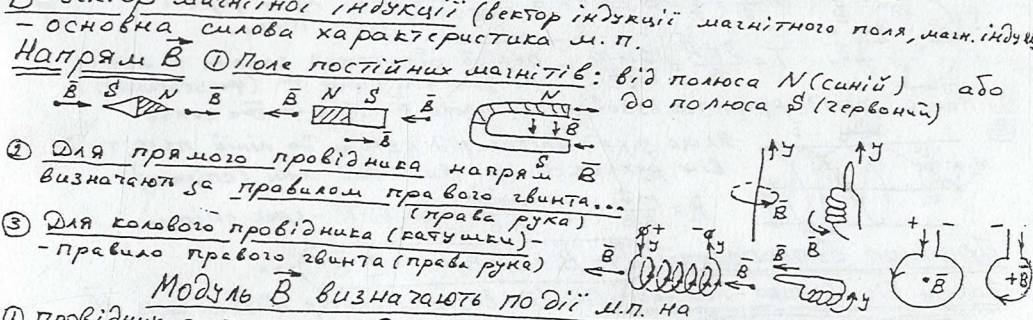


VI Електродвигун при проходженні рамки через полюси рівновати напрям струму шняють на протилежний



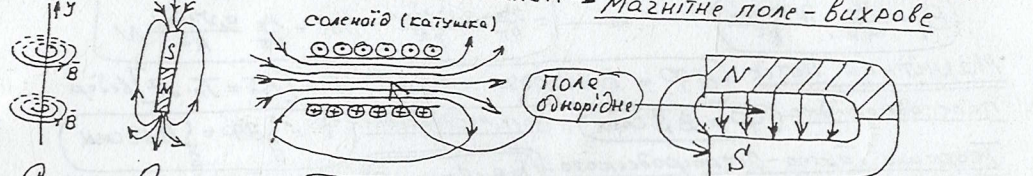
Магнітна взаємодія - взаємодія струмів (рухомих зарядів).
Матеріальним носієм взаємодії рухомих зарядів (струмів) є МАГНІТНЕ ПОЛЕ (м.п.):
I Матеріальне, існує незалежно від нас і наших знань про нього.
II Має властивості: 1. Джерелом м.п. є рухомі заряди (макро і мікро-струми), змінне ел. поле. 2. Діє з певною силою на рухомі заряди ($F = q v B$ - сила Лоренца), струми ($F_A = I B L$ - сила Ампера) 3. Здатне виконати роботу - володіє енергією 4. Поширюється з скінченною швидкістю $c = 300\,000 \text{ м/с}$
Магн. поле досліджують за допомогою магн. стрілок або рамок з струмом (контур), на які м.п. створює орієнтуєчу дію...

B-вектор магнітної індукції (вектор індукції магнітного поля, магн. індукція) - основна силова характеристика м.п.
Напряж B 1. Поле постійних магнітів: від полюса N (синій) до полюса S (червоний)
2. Для прямого провідника напрям B визначають за правилом правого гвинта... (права рука)
3. Для колового провідника (катушки) - правило правого гвинта (права рука)



Модуль B визначають по дії м.п. на
1. провідник з струмом $B = \frac{F_{\text{max}}}{I L}$
2. контур з струмом $B = \frac{M}{I S}$
3. рухомий заряд $B = \frac{F_{\text{max}}}{q v}$

Магнітне поле зображають - лінії магнітної індукції (силові)
1. математична лінія, дотична до лінії в точці співпадає з напрямом B в цій точці 2. густина ліній ~ модулю B 3. не перериваються 4. не перетинаються 5. не мають ні початку, ні кінця - замкнуті



Сила Ампера (дослідно)
 $\Delta F_A = I \Delta l B \sin \alpha$ - сила що діє на провідник з струмом з боку однорідного магнітного поля.
 $\alpha = (\Delta \vec{l}, \vec{B})$
 $\Delta \vec{F}_A = I [\Delta \vec{l} \times \vec{B}]$
напряж B співпадає з B для неоднорідного поля або кривого провідника.
 $F = I \int \vec{B} d\vec{l} \sin \alpha$
Напряж F_A - правило лівої руки...

Закон Ампера $F = \frac{\mu_0 \mu_r I_1 I_2}{4 \pi d} \Delta l$ - сили взаємодії двох паралельних провідників з струмом...
1 А (ампер) - основна одиниця (SI)

K-45

Сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

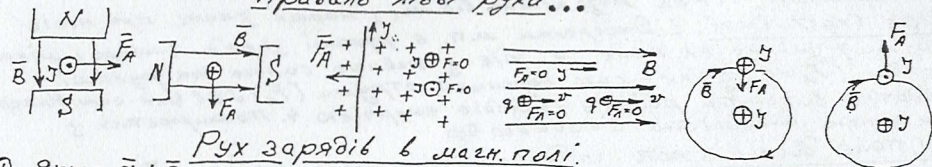
$$F_L = \frac{q v B \sin \alpha}{N} = \frac{q n v S B \sin \alpha}{N}$$

$$= q v B \sin \alpha \cdot \frac{n \cdot \Delta l}{N} = q v B \sin \alpha$$

Сила, що діє на рухомий заряд з боку магн. поля

Напрямок сили Лоренца для +q - правило лівої руки, для -q - правило правої руки

Правило лівої руки...



- ① Якщо $\vec{v} \perp \vec{B}$ - заряд в м.п. рухається по колу, так як $\vec{F}_L \perp \vec{v}$
- $\frac{mv^2}{R} = q v B \Rightarrow R = \frac{mv}{qB}$ - радіус руху заряду в магн. полі.
- $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$ - період обертання заряду в м.п. не залежить від v (фокусування)
- ② Якщо заряд рухається вздовж або проти $\vec{B}$ $F_L = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{const}$
- ③ Якщо заряд вітає під кутом до лінії поля, то він рухається по гвинтовій лінії (спіраль)
- $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$ $T = \frac{2\pi m}{qB}$ $h = v_{\parallel} T$ - крок спіралі

Принцип суперпозиції $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots = \sum \vec{B}_i$

Закон Біо-Савара-Лапласа (дослід) - визначає вектор індукції м.п. $d\vec{B}$ утвореного елементом струму $Id\vec{l}$ ($\vec{B} \perp \vec{r}$)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{R^2}$$

$$\alpha = (\vec{dl} \cdot \vec{R})$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^3} [\vec{dl} \cdot \vec{R}]$$

Вектор $d\vec{B}$ перпендикулярний площині векторів $d\vec{l}$ і $\vec{R}$ - напрям - правий гвинт

Індукція м.п. рухомого заряду

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{R^2}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{R^2} n \Delta l = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{R^2} N$$

Магнітний потік $d\Phi = B dS \cos \alpha = B_{\perp} dS$ $\Phi = [B S] = T \cdot m^2$ вбєр

поле однорідне $\Phi = B S \cos \alpha$ Поле неоднорідне $\Phi = \int_S d\Phi = \int B dS \cos \alpha$

Теорема Гауса-Остроградського $\oint_S \vec{B} d\vec{S} \cos \alpha = 0$ - потік $\vec{B}$ крізь замкнуту поверхню = 0

Суть теорем: ① лінії вектора $\vec{B}$ не мають ні початку, ні кінця ② потік вектора $\vec{B}$ крізь поверхню S , обмежену замкнутим контуром, не залежить від форми поверхні S ③ у природі не існує магнітних зарядів, на яких би починались і закінчувались лінії м.п. (м.п. не має джерел у протязі до електричного).

Теорема про циркуляцію вектора $\vec{B}$ $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$ - циркуляція вектора $\vec{B}$ по замкнутому контурі рівна добутку магнітної сталі μ_0 на алгебраїчну суму струмів охоплених контуром (струм $I > 0$, якщо його напрям збігається з обходом контура правилом правої гвинта).

Суть теорем: магнітне поле - вихрове (не потенціальне)

Роль теорем - та сама, що і теорем Гауса для ел. поля.

K-46

Розрахунок магнітних полів

① Поле колового провідника (за принципом суперпозиції)

для точки O $B_0 = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}$

② Поле нескінченного прямого провідника (на відстані R)

$dl \cos \alpha = r \cdot d\alpha$ а) За принципом суперпозиції

$B = \int dB = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cos \alpha}{R^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int dl \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} r \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} r \sin \alpha \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \frac{2}{\cos \alpha}$

б) За теоремою про циркуляцію вектора $\vec{B}$ з міркувань симетрії ясно, що лінії поля - кола з центрами на осі провідника, вектор $\vec{B}$ однакокий в різних точках рівновіддалених від провідника, тоді для колового контура L:

$\oint \vec{B} d\vec{l} = B \oint d\vec{l} = B \cdot 2\pi R = \mu_0 I \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$

③ Поле соленоїда n-кількості витків на одиницю довжини

З досвіду відомо: ① індукція поля ззовні $B \approx 0$ ② поле в середині - однорідне $\vec{B} = \text{const}$, тоді, для прямокутного контура L:

$\oint \vec{B} d\vec{l} = B \cdot l = \mu_0 I n l \Rightarrow B = \mu_0 n I$ Поле соленоїда

Магн. поле в середовищі $\mu = \frac{B}{B_0}$ - магнітна проникність для однорідного ізоотропного магнетика, тисельно м.п. у вакуумі, тоді для ретовини:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{R^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{R^2}$$

З-н Біо-Савара-Лапласа $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$ теорема про циркуляцію $\vec{B}$

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{4\pi R}$$
 3-н Ампера

КОНТУР ІЗ СТРУМОМ у магн. полі (орієнтована дія)

Однорідне поле - на контур діє момент сил.

① стійка рівновага - зовн. поле $\vec{B}$ і поле контура $\vec{B}_{\text{конт}}$ співпадають

② рівновага не стійка - поля $\vec{B}$ і $\vec{B}_{\text{конт}}$ протилежно направлені

$$M_{\text{конт}} = 2F \cdot \frac{a}{2} = F \cdot a = I B l \sin \alpha = I S B \sin \alpha = p_m \cdot B_{\perp}$$

$$p_m = I S$$
 - магнітний момент контура (для контура довільної форми)

Робота м.п. по переміщенню провідника із струмом (контур)

для однорідного поля $A = \vec{F}_L \cdot d\vec{x} = I B_{\perp} L d\vec{x} = I B_{\perp} dS = I d\Phi$ $(A = I d\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1))$

для неоднорідного поля $A = \int I d\Phi$

Робота по повороту контура із струмом в м.п. (однорідне поле)

$$A = I \Delta \Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I 2\Phi_2 = 2 I \Phi$$

$$\Phi_1 < 0 \quad \Phi_2 > 0$$

$$\Phi_1 > 0 \quad \Phi_2 < 0$$

Робота при переміщенні в м.п. провідника або контура із струмом виконується за рахунок енергії джерела струму