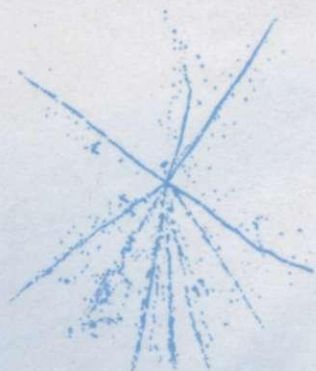
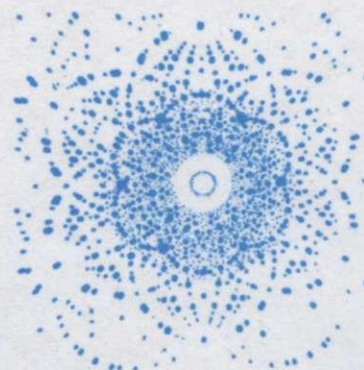
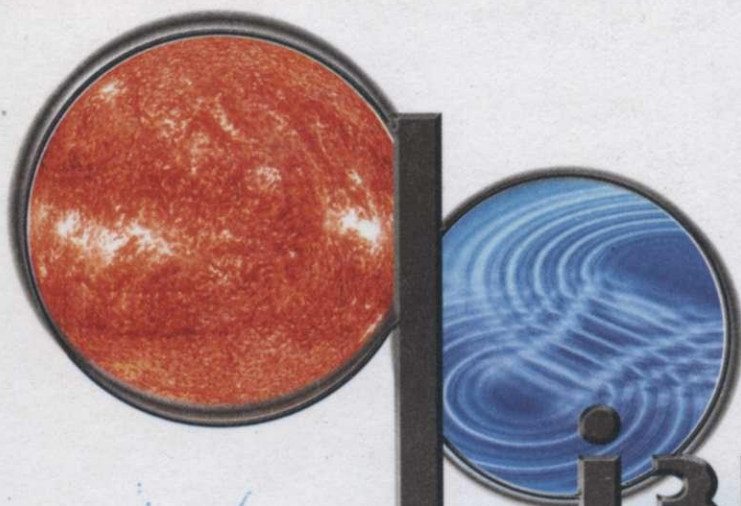


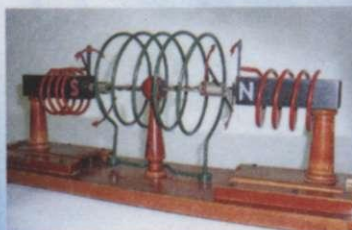
Володимир Сиротюк, Володимир Баштовий



Фізика

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

11



Володимир Сиротюк
Володимир Баштовий

ФІЗИКА

Підручник для **11** класу
загальноосвітніх навчальних закладів

Рівень стандарту

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Харків «Синія» 2011

ББК 22.3я721
С 40

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(Наказ від 16.03.2011 р. №235)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Наукову експертизу підручника проводив
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
Національної академії наук України

Психолого-педагогічну експертизу підручника проводив
Інститут педагогіки
Національної академії педагогічних наук України

Сиротюк, В. Д.
С 40 Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стандарту) / В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий. - Харків: Сиція, 2011. - 304 с.
ISBN 978-966-2542-02-8

ББК 22.3я721

ISBN 978-966-2542-02-8

© В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий, 2011
© Видавництво «Сиція», 2011
© Художньоформлення, Т.М. Канарська,
2011

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Розділ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ І СТРУМ

§ 1.	Електричне поле	9
§ 2.	Напруженість електричного поля	11
	<i>Це цікаво знати.</i>	13
§ 3.	Потенціал електричного поля. Різниця потенціалів	13
	<i>Це цікаво знати.</i>	15
§ 4.	Електроємність. Конденсатор. Енергія електричного поля	16
	<i>Задачі та вправи.</i>	22
§ 5.	Електричний струм. Електричне коло. З'єднання провідників	24
§ 6.	Робота та потужність електричного струму	28
§ 7.	Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола	30
	<i>Це цікаво знати.</i>	33
	Лабораторна робота № 1. Вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.	35
	<i>Задачі та вправи.</i>	36
§ 8.	Електричний струм у різних середовищах	40
§ 9.	Електричний струм у напівпровідниках	42
§ 10.	Донорні та акцепторні домішки. Електричний струм через р-п-перехід	44
§ 11.	Напівпровідниковий діод. Застосування напівпровідників	47
	<i>Це цікаво знати.</i>	49
	Лабораторна робота № 2. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом	51
	<i>Задачі та вправи.</i>	52
	<i>Перевірте свої знання.</i>	53
	<i>Контрольні запитання.</i>	53
	<i>Що я знаю і вмію робити.</i>	54
	<i>Тестові завдання.</i>	55

Розділ 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

§ 12.	Взаємодія струмів. Магнітне поле. Дія магнітного поля на провідник зі струмом	62
§ 13.	Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції	64
§ 14.	Сила Ампера. Сила Лоренца	67
	<i>Це цікаво знати.</i>	69
	<i>Задачі та вправи.</i>	71
§ 15.	Магнітні властивості речовини. Магнітний запис інформації	74
	<i>Це цікаво знати.</i>	76
§ 16.	Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції	77
	Лабораторна робота № 3. Дослідження явища електромагнітної індукції	80
§ 17.	Індуктивність. Енергія магнітного поля котушки зі струмом	81
	<i>Задачі та вправи.</i>	84
§ 18.	Змінний струм. Генератор змінного струму	88
	<i>Це цікаво знати.</i>	90
§ 19.	Трансформатор. Виробництво, передача та використання енергії електричного струму	92
	<i>Задачі та вправи.</i>	95
	<i>Перевірте свої знання.</i>	97

Контрольні запитання	97
Що я знаю і вмію робити	98
Тестові завдання	99

МЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

Розділ 3. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

§ 20. Коливальний рух. Період і частота коливань	109
§ 21. Гармонічні коливання	110
§ 22. Математичний маятник. Період коливань математичного маятника	114
Лабораторна робота № 4. Виготовлення маятника і визначення періоду його коливань	115
§ 23. Вільні коливання. Вимушені коливання. Резонанс	116
§ 24. Поширення механічних коливань у пружному середовищі. Поперечні та поздовжні хвилі. Довжина хвилі.	119
<i>Задачі та вправи.</i>	121
§ 25. Коливальний контур. Виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі	125
§ 26. Гармонічні електромагнітні коливання. Частота власних коливань контуру.	126
§ 27. Затухаючі та вимушені електромагнітні коливання. Резонанс	130
§ 28. Електромагнітне поле. Електромагнітні хвилі	132
<i>Це цікаво знати.</i>	135
§ 29. Швидкість поширення, довжина, частота електромагнітної хвилі. Шкала електромагнітних хвиль.	138
§ 30. Властивості електромагнітних хвиль та їх застосування	140
<i>Задачі та вправи.</i>	143
<i>Перевірте свої знання.</i>	146
Контрольні запитання.	146
Що я знаю і вмію робити.	146
Тестові завдання.	147

ОПТИКА І КВАНТОВА ФІЗИКА

Розділ 4. ХВИЛЬОВА І КВАНТОВА ОПТИКА

§ 31. Розвиток поглядів на природу світла	155
§ 32. Поширення світла в різних середовищах. Явища на межі двох середовищ	156
<i>Це цікаво знати.</i>	160
<i>Задачі та вправи.</i>	161
§ 33. Інтерференція світла	163
§ 34. Дифракція світла	168
Лабораторна робота № 5. Спостереження інтерференції та дифракції світла	172
§ 35. Поляризація світла. Поперечність світлових хвиль і електромагнітна теорія світла	173
<i>Це цікаво знати.</i>	175
§ 36. Дисперсія світла	177
<i>Задачі та вправи.</i>	180
§ 37. Розвиток квантової фізики. Гіпотеза Планка	182
§ 38. Фотон. Енергія, маса, імпульс фотона. Фотоелектричний ефект.	184
§ 39. Застосування фотоефекту.	187
§ 40. Люмінесценція.	188
§ 41. Квантові генератори та їх застосування.	191
§ 42. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла	194

<i>Задачі та вправи</i>	195
<i>Перевірте свої знання</i>	197
<i>Контрольні запитання</i>	197
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	198
<i>Тестові завдання</i>	199

АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

Розділ 5. АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

§ 43. Історія вивчення атома	205
§ 44. Квантові постулати Бора	207
§ 45. Модель атома Гідрогену за Бором. Труднощі теорії Бора	210
§ 46. Спектроскоп. Спектральний аналіз	212
<i>Це цікаво знати</i>	216
Лабораторна робота № 6. Спостереження неперервного і лінійчастого спектрів речовини	217
§ 47. Рентгенівське випромінювання	218
<i>Задачі та вправи</i>	222
§ 48. Атомне ядро. Ядерні сили. Енергія зв'язку атомних ядер	224
§ 49. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	228
§ 50. Ядерні реакції	231
§ 51. Ланцюгова реакція поділу ядер Урану	233
§ 52. Фізичні основи ядерної енергетики	234
§ 53. Дія радіоактивного випромінювання на живий організм	239
§ 54. Елементарні частинки, їх класифікація та характеристика	241
<i>Задачі та вправи</i>	245
<i>Перевірте свої знання</i>	249
<i>Контрольні запитання</i>	249
<i>Що я знаю і вмію робити</i>	249
<i>Тестові завдання</i>	250

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Робота № 1. Вивчення конденсаторів	255
Робота № 2. Дослідження електричних кіл	256
Робота № 3. Визначення довжини світлової хвилі	257
Робота № 4. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника	258
Робота № 5. Вивчення будови дозиметра і складання радіологічної карти місцевості	259
Робота № 6. Вивчення треків заряджених частинок за готовими фотографіями	260

УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

§ 55. Сучасна фізична картина світу	262
§ 56. Науково-технічний прогрес і проблеми екології	264
§ 57. Фізика і загальнолюдські цінності	268
Узагальнююче повторення курсу фізики	271

ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

Фізичні задачі навколо нас	287
Відповіді до рубрики «Задачі та вправи»	291
Відповіді до рубрики «Фізичні задачі навколо нас»	294
Словник фізичних термінів	296
Предметно-іменний покажчик	302

Юні друзі!

Ви відкрили підручник, з яким працюватимете у навчальному році, що є завершальним у школі. Сподіваємося, він буде добрим помічником у вашій подорожі до країни знань та допоможе вам докладніше ознайомитися з явищами навколишнього світу і вибрати майбутню професію.

В 11 класі ви будете вивчати електродинаміку, коливання і хвилі, хвильову та квантову оптику, атомну і ядерну фізику. Теоретичний матеріал у пропонованому підручнику допоможе вам зрозуміти та пояснити відповідні процеси і явища, закони і теорії. Звертайте увагу на текст, виділений жирним шрифтом та кольором. Це фізичні терміни, визначення, важливі правила і закони. Їх треба пам'ятати і вміти застосовувати.

Підручник містить багато ілюстрацій; у ньому розглядаються досліди, які ви можете виконати самостійно або за порадами вчителя. Вони допоможуть глибше зрозуміти фізичний зміст явищ, що вивчаються. Рубрика «Це цікаво знати!» наприкінці деяких параграфів, без сумніву, розширить ваш кругозір.

Після кожного параграфа є запитання і завдання, відповіді на які допоможуть вам краще засвоїти викладений матеріал, закріпити формулювання означень, законів. Частина з них має творчий характер, потребує вміння аналізувати умови завдання, а також простежувати логічну послідовність і зв'язки у перебігу фізичних явищ.

У рубриці «Розв'язуємо разом» наведено зразки розв'язання найважливіших типів задач. Підручник містить задачі, вправи і запитання різних рівнів складності: А — на закріплення, В — творчого характеру.

Виконані вами лабораторні роботи і роботи фізичного практикуму збагатять вас поглибленим розумінням закономірностей фізичних явищ та вмінням ставити досліди і користуватися вимірювальними приладами.

Якщо вам знадобиться дізнатися про якийсь фізичний термін або правило, то скористайтеся «Словником фізичних термінів» і предметно-іменним покажчиком, що містяться наприкінці підручника.

Виконуючи спостереження і досліди з фізики, будьте уважними, додержуйтеся правил безпеки.

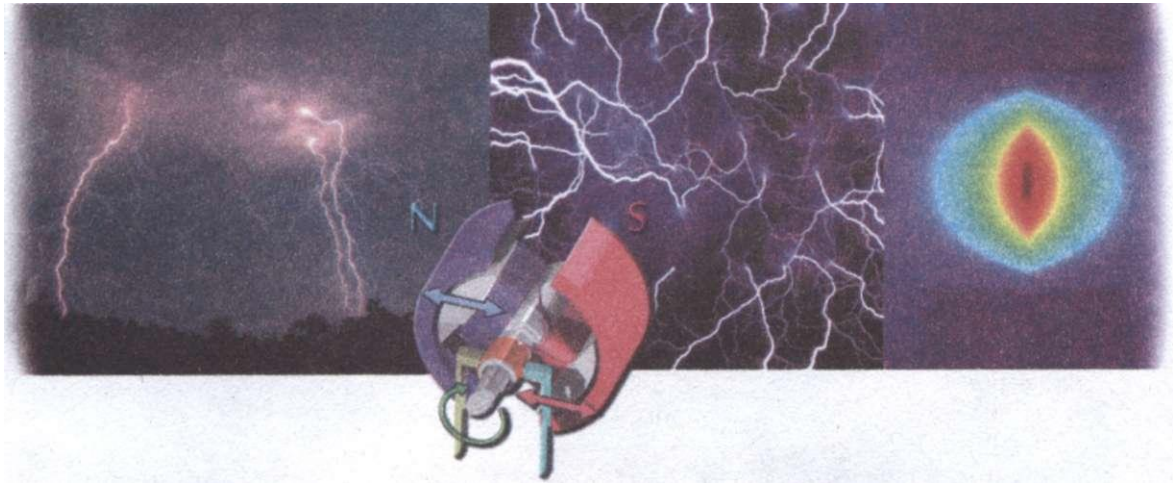
Намагайтеся бути максимально активними у засвоєнні матеріалу. Частіше обмінюйтеся думками щодо прочитаного зі своїми товаришами. Для з'ясування важких і спірних питань звертайтеся, у першу чергу, до вчителя, довідників та енциклопедій. Для перевірки правильності розуміння вивченого матеріалу корисно обговорювати повідомлення, доповіді учнів, розв'язки задач.

Із самого початку налаштуйтеся на те, що вивчення фізики — це не легка праця. Радість пізнання дається тільки як нагорода за перемогу над труднощами; її можна порівняти з радістю альпініста, який підкорив вершину. Виявіть працездатність, волю, і робота з підручником надасть вам немало радісних хвилин.

Щасливої вам дороги до знань!

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА





Розділ 1 Електричне поле і струм

- Електричне поле
- Напруженість електричного поля
- Потенціал електричного поля.
Різниця потенціалів
- Електроємність. Конденсатор.
Енергія електричного поля
- Електричний струм. Електричне коло.
З'єднання провідників
- Робота та потужність електричного струму
- Електрорушійна сила.
Закон Ома для повного кола
- Електричний струм у різних середовищах
- Електричний струм у напівпровідниках
- Донорні та акцепторні домішки.
Електричний струм через р-п-перехід.
Напівпровідниковий діод.
Застосування напівпровідників

§ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Перед тим, як почати розгляд електричного поля та його властивостей, пригадаємо, що ви вивчали раніше. З курсу фізики 7 та 9 класів ви дізналися, що всі тіла, які нас оточують; складаються з атомів, а атоми можуть об'єднуватися в молекули. До складу всіх без винятку атомів (і молекул) входять так звані елементарні частинки — найменші частинки речовини, що мають електричні заряди, *електрони* і *протони*: електрони мають *негативний* заряд, а протони — такий самий за значенням, але *позитивний*.

Електрон (з грец. — *янтар, бурштин*) — стабільна елементарна частинка з негативним електричним зарядом $e = -1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$ Кл і масою $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг.

Тепер пригадаємо властивості заряджених тіл. Зарядимо натиранням об хутро ебонітову паличку і підвісимо її на нитці. Якщо піднести до неї так само заряджену іншу ебонітову паличку (мал. 1), то вони будуть відштовхуватися одна від одної. Якщо ж до зарядженої ебонітової палички піднести заряджену тертям об шовк чи сухий папір скляну паличку, то палички будуть притягуватися одна до одної (мал. 2).

Отже, однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменно заряджені тіла притягуються.

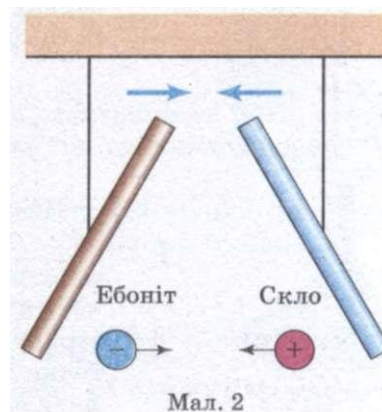
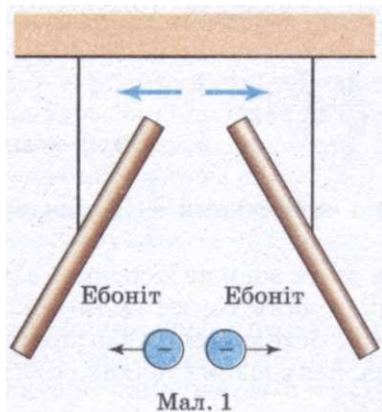
Якщо заряджені тіла *відштовхуються* або *притягуються*, то говорять, що вони взаємодіють між собою. Пригадаємо закон взаємодії, експериментально відкритий у XVIII столітті французьким вченим Ш. Кулоном.

Сила взаємодії двох заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними, та напрямлена вздовж лінії, що сполучає ці тіла.

Математично закон Кулона (взаємодії) можна записати так:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

де q_1, q_2 — взаємодіючі точкові заряди; r — відстань між ними; k — коефіцієнт, який залежить від вибору одиниць величин, що входять до закону, $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.



Розглянемо детальніше саме явище електричної взаємодії. Закріпимо металеву кулю на стержні електрометра (мал. 3) і зарядимо її від ебонітової палички, потертої хутром. Стрілка відхилиться від положення рівноваги, це засвідчить, що куля має електричний заряд. Підвісимо на тонкій нитці легку, виготовлену з фольги, гільзу і почнемо підносити її до кулі. На певній відстані помітимо, що гільза притягується до кулі, внаслідок чого нитка відхилиться від вертикального положення.

Наша уява звикла до того, що дія одного тіла на інше відбувається внаслідок безпосереднього контакту між ними. Так, вагон почне рухатися лише тоді, коли локомотив буде тягти чи штовхати його. М'яч змінить напрям руху в той момент, коли доторкнеться до ноги футболіста чи стійки воріт.

Який же механізм взаємодії заряджених тіл? Відповідь на це запитання дав англійський фізик **М. Фарадей**, осмисливши всі відомі на той час знання з електрики і дійшовши висновку про існування електричного поля як виду матерії.

Електричне поле є особлива форма матерії, нерозривно зв'язана з усяким електричним зарядом. Через електричне поле відбуваються всі електричні взаємодії.

Сили, з якими електричне поле діє на заряджені тіла, називаються електричними силами.

Дослідження електричного поля можна проводити, поміщаючи в поле невеликі заряджені тіла. Ними можуть бути легкі заряджені кульки чи гільзи.

Такі тіла ми далі називатимемо пробними зарядами. За їх допомогою виявляють наявність електричного поля в даній точці простору. Про наявність поля свідчить дія на заряджене тіло певної сили.

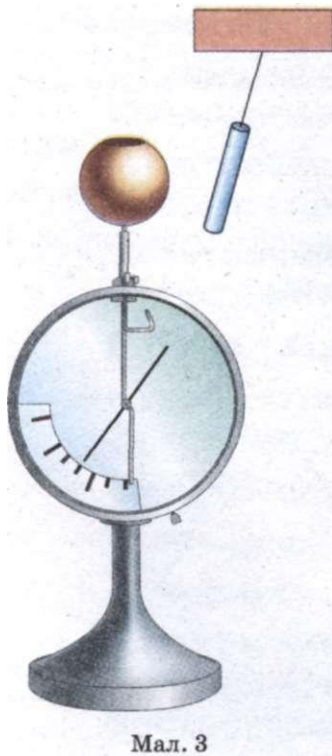
Дія електричного поля на заряджені тіла є основною характеристикою електромагнітного поля.

Якщо в конкретну точку електричного поля послідовно поміщати пробні заряди q_1, q_2, \dots, q_n , які мають різні значення, то на них з боку поля будуть діяти різні сили $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$. Якщо знайти відношення кожної з цих сил до значення пробного заряду, на який діє ця сила, то отримаємо одне й те саме значення:

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \frac{\vec{F}_n}{q_n}.$$

Це означає, що відношення $\frac{\vec{F}}{q}$ характеризує

електричне поле, адже воно не залежить від значення вмішеного у дану точку поля пробного заряду і має одне й те саме значення для конкретної точки даного поля, але у різних точках поля може мати різні значення.



Мал. 3

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як проявляється взаємодія заряджених тіл?
2. Сформулюйте закон Кулона.
3. Що таке електричне поле?
4. Що є основною характеристикою електромагнітного поля?

§ 2. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Фізичну величину, яка визначається відношенням сили, що діє на заряд, вміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, називають *напруженістю електричного поля*. Позначається напруженість літерою E і визначається за формулою

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напруженість електричного поля — векторна фізична величина, яка є основною кількісною характеристикою електричного поля. Її називають **силовою характеристикою поля**.

Одиницею напруженості електричного поля в СІ є **1 вольт на 1 метр** $\left(\frac{1\text{В}}{1\text{м}}\right)$

$$\frac{1\text{Н}}{1\text{Кл}} = \frac{1\text{В}}{1\text{м}}$$

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд, розміщений у даній точці поля.

Якщо поле створене нерухомим точковим зарядом q_0 , то на пробний заряд q буде діяти сила $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$. Тому значення напруженості електростатичного поля, створеного нерухомим точковим зарядом, розраховується за формулою

$$E = k \frac{q_0}{r^2}$$

де E — напруженість електричного поля, $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, q_0 — точковий заряд, r — відстань між зарядами.

Для того, щоб визначити напруженість електричного поля, створеного системою нерухомих точкових заряджених тіл, слід виходити з *принципу суперпозиції*, згідно з яким:

повна напруженість поля в точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими точковими зарядженими тілами:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Електричне поле можна зображати, проводячи вектори напруженості в кожній його точці. Проте таке графічне зображення є незручним, тому що вектори напруженості накладаються один на одного і спостерігається заплутана картина.

М. Фарадей запропонував більш наочний метод зображення електричних полів за допомогою *силових ліній* (*ліній напруженості*).

Силкові лінії точкових зарядів являють собою прямі лінії, що проходять через ці заряди.

Силковими лініями поля взаємодіючих тіл називаються криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора напруженості.

Вважається, що силкові лінії починаються на позитивно заряджених тілах і закінчуються на негативно заряджених (мал. 4).

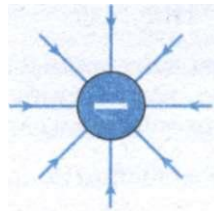
Лінії напруженості не перетинаються, адже в кожній точці поля вектор \vec{E} має лише один напрям. З того, як густо розміщені силкові лінії в полі, можна судити про напруженість поля.

Отже, силкові лінії дають наочну картину розподілу електричного поля у просторі: густина силових ліній і їх напрям характеризують значення і напрям вектора напруженості електричного поля в кожній його точці. Силкові лінії електричного поля ніде не перетинаються, вони можуть тільки сходитись до заряду або розходитись від нього.

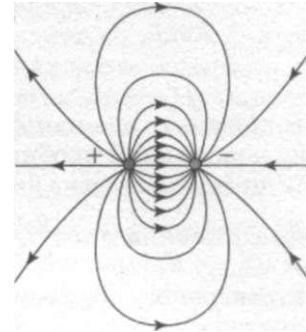
На мал. 4 подано приклади ліній напруженості позитивно і негативно заряджених кульок (мал. 4, а, б), двох різнойменно заряджених кульок (мал. 4, в), двох однойменно заряджених кульок (мал. 4, г), двох пластин, заряди яких однакові за модулем і протилежні за знаком (мал. 4, д).



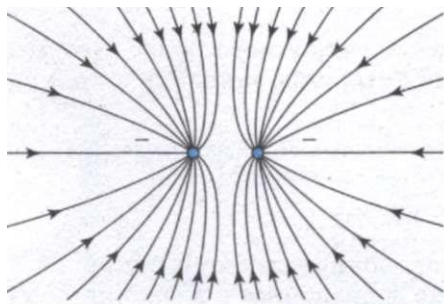
а



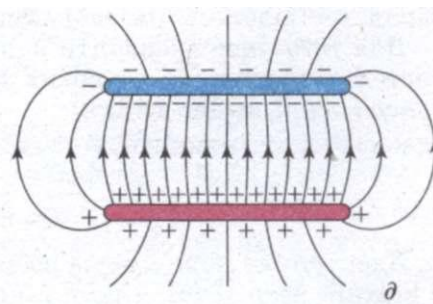
б



в



г



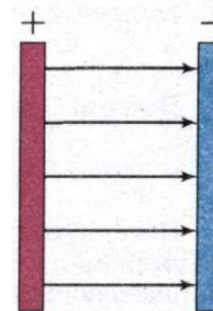
д

Мал. 4

Електричне поле, в якому напрям і значення напруженості в усіх точках однакові, називається однорідним. В однорідному полі силові лінії паралельні одна одній, мають однаковий напрям, однакову густоту. Прикладом однорідного поля може слугувати поле між двома паралельними металевими пластинами з рівними за значенням і протилежними за знаком зарядами (мал. 5).

Електричне поле не має меж, воно існує в усіх точках простору. Якщо й кажуть про певну межу, то мають на увазі певну точку поля, в якій прилади вже не можуть виявити це поле.

На основі закону Кулона і принципу суперпозиції полів можна визначити напруженість поля практично будь-якої сукупності заряджених тіл.



Мал. 5

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають пробним зарядом?
2. Що таке напруженість електричного поля? Що вона характеризує?
3. Як визначається напруженість електричного поля?
4. У чому полягає принцип суперпозиції?
5. Які лінії називаються силовими?
6. Яке електричне поле називається однорідним?



Це цікаво знати

Велике значення напруженості поблизу вістря на зарядженому провіднику приводить до явища, відомого під назвою «електричний вітер».

В атмосферному повітрі завжди є невелика кількість позитивних йонів і вільних електронів, які виникають під впливом космічних променів, випромінювання радіоактивних речовин тощо. У сильному електричному полі біля вістря позитивні йони рухаються і захоплюють за собою молекули повітря, утворюючи «електричний вітер». Якщо біля вістря розмістити полум'я свічки, то воно під дією «вітру» буде відхилятися.

§ 3.

ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ. РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

На кожен заряд, розміщений в електричному полі, діє сила, під дією якої він переміщується. При русі заряду електричне поле виконує певну роботу.

Роботу сил електричного поля можна розглядати як зміну потенціальної енергії, яку має кожне заряджене тіло, що перебуває в цьому електричному полі. Якщо позначити потенціальну енергію зарядженого тіла, що переміщується під дією електричних сил, у початковій і кінцевій точках траєкторії відповідно W_1 і W_2 , то робота сил електричного поля визначатиметься за формулою

$$A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1).$$

Різні пробні заряди у даній точці поля матимуть різні потенціальні енергії. Водночас відношення потенціальної енергії пробних зарядів до їх значень для даної точки поля є величиною сталою.

Фізична величина, яка визначається відношенням потенціальної енергії пробного заряду, що знаходиться у даній точці електричного поля, до значення заряду, називається **потенціалом**.

Потенціал позначається літерою ϕ і записується у вигляді

$$\phi = \frac{W}{q}.$$

Потенціал є скалярною величиною. Потенціали точок поля позитивно зарядженого тіла мають додатне значення, потенціали ж негативно зарядженого тіла мають від'ємне значення.

Одиницею потенціалу в СІ є 1 вольт (1 В): $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$.

Потенціал характеризує електричне поле у даній його точці та є його енергетичною характеристикою.

Якщо позначити потенціали точок, в яких перебував пробний заряд до і після виконання роботи силами електричного поля з його переміщення, відповідно ϕ_1 і ϕ_2 і врахувати, що $W = \phi q$, то можна записати

$$A = W_1 - W_2 = q(\phi_1 - \phi_2).$$

Значення цієї роботи пропорційне значенню переміщеного заряду і залежить від того, з якої в яку точку переміщується заряд.

Фізична величина $(\phi_1 - \phi_2)$ називається різницею потенціалів і визначається відношенням роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$(\phi_1 - \phi_2) = \frac{A}{q}.$$

Значення потенціальної енергії залежить від вибору початку її відліку (вибору нульового рівня потенціальної енергії). Отже, значення потенціалу залежить від вибору точки, в якій потенціал дорівнює нулю. Такою точкою у фізиці вважають точку, що знаходиться у нескінченності.

Тому **потенціал** даної точки електричного поля можна визначити як фізичну величину, що показує, яка робота виконується електричними силами під час переміщення одиничного позитивного пробного заряду із даної точки у нескінченність.

Слід зазначити, що поняття «нескінченність», де прийнято вважати $\phi = 0$, фізично не визначено. Тому під час знаходження потенціалу в довільній точці поля завжди допускають неточність на значення потенціалу в точці, яку вважають розміщеною у нескінченності. Іншими словами, потенціал довільної точки поля визначають завжди з точністю до адитивної сталої. Тому поняття «потенціал» у цьому розумінні дещо фізично не визначено. Більш точним й однозначним поняттям є «різниця потенціалів» як фізична величина, що визначається роботою під час переміщення пробного заряду $q = 1 \text{ Кл}$ між точками поля з потенціалами ϕ_1 і ϕ_2 .

На практиці часто буває зручнішим вважати рівним нулю потенціал Землі. Це допустимо, оскільки при будь-яких розрахунках важливо знати різницю потенціалів між деякими точками електричного поля, а не абсолютне значення потенціалів у цих точках. Вимірюють різницю

потенціалів заземленим електрометром, порівнюючи потенціал зарядженого електрометра з потенціалом Землі.

Різницю потенціалів в електричному полі називають **напругою**.

Позначають напругу літерою U . Одиницею напруги в СІ є 1 вольт (1 В).

Враховуючи, що $U = \frac{A}{q}$ і $A = qEd$, знаходимо зв'язок між напругою і напруженістю електричного поля:

$$E = \frac{U}{d}$$

Вчені домовилися проводити поверхні так, щоб різниця потенціалів для двох сусідніх поверхонь була всюди одна й та сама. Тоді за густотою еквіпотенціальних поверхонь можна зробити висновок про значення напруженості поля: чим густіше розміщені ці поверхні, тим швидше змінюється потенціал під час переміщення вздовж нормалі до поверхонь і тим більша у цьому місці напруженість \vec{E} .

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як визначити роботу сил електричного поля?
2. Дайте визначення потенціалу.
3. Яких значень може набувати потенціал?
4. Що таке різниця потенціалів в електричному полі?
5. Які одиниці напруги в системі СІ?



Це цікаво знати

Усе життя людину оточують природні атмосферні електричні поля. Найяскравіше проявляє себе електричне поле під час грози. Тоді його напруженість біля Землі досягає 10 кіловольт на метр (кВ/м). Але і в безхмарну погоду напруженість атмосферного поля в середньому становить 130 В/м. Ми говоримо про середнє значення тому, що, як і, допустимо, сонячна активність, атмосферне електричне поле коливається циклічно, досягаючи максимуму в певні періоди. Найбільші значення припадають на 22-річний (два одинадцятирічних), річний, 27-добовий і добовий періоди. Залежить це значення і від географічного положення: максимальна сила електричного поля в помірних широтах, мінімальна — на полюсах і біля екватора. Але всі ці зміни сприймаються організмом як належне.

Внаслідок активної науково-технічної діяльності, особливо в останні десятиліття, людина привнесла свої корективи в атмосферу, що оточує нас. Рівень напруженості електричного поля зріс, і в деяких місцях став вже небезпечний для живого організму.

Особливо негативно електричне поле впливає на здоров'я людини там, де є високовольтні лінії електропередач (ЛЕП). Напруженість електричного поля безпосередньо під ЛЕП залежно, звичайно, від її конструкції, досягає іноді десятків кіловольт на метр.

На думку вчених, основний механізм біологічної дії електричного поля — поява в організмі «струмів зсуву». Так називається рух електрично заряджених частинок.

Дослідження показали, що ступінь функціональних розладів залежить від тривалості перебування людини в електричному полі. Найбільш чутлива до цього нервова систе-

ма, опосередковано можуть виникати розлади діяльності і серцево-судинної системи, зміни у складі крові.

Тому люди, які знаходяться в зоні високовольтних споруд, мають дотримуватися всіх необхідних норм безпеки.

Вченими встановлена потенційна небезпека перебування людини в електричному полі, напруженість якого перевищує 25 кВ/м. Тут можна працювати тільки із застосуванням засобів індивідуального захисту.

Безпечним є рівень напруженості електричного поля в житлових будівлях, де людина перебуває за часом необмежено багато, — 0,5 кВ/м. Для порівняння можна навести приклад: такий електро побутовий прилад, як електроковдра, створює рівень напруженості до 0,2 кВ/м. Допустимий рівень напруженості в районах житлової забудови становить 1 кВ. А ось у місцях, маповідвідуваних людьми (незабудовані території, сільськогосподарські угіддя), безпечний рівень встановлений до 15 кВ/м, у важкодоступних, практично непрохідних місцях — 20 кВ/м.

Не знаючи про те, як впливає на організм електричне поле високої напруги, деякі люди в зоні ЛЕП розбивають городи, довго і часто працюють там. Це неприпустимо! Навіть професіоналам, що за службовим обов'язком здійснюють контроль і ремонт ЛЕП, дозволяється працювати не більше, ніж півтори години в день, якщо напруженість там досягає 15 кВ/м, і не більше, ніж 10 хвилин при напруженості до 20 кВ/м.

У зоні електричного поля ЛЕП небажано гуляти, кататися на лижах, особливо дітям та людям з ослабленою серцево-судинною системою. Це стосується і міських територій, через які проходять високовольтні лінії. Потрібно максимально обмежити своє перебування в подібних місцях. Ночівлі ж беззастережно виключаються.

Хотілося б застерегти аматорів-садівників, щоб вони не будували ніяких металевих будиночків, сарайчиків для зберігання інвентарю на території ЛЕП. Дотик до такої споруди, навіть якщо людина ізольована від Землі, наприклад гумовим взуттям, може завдати дуже сильне і далеко не завжди безпечне для життя ураження струмом.

§ 4.

ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОР. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.

Якщо ізольованому провіднику будь-якої форми, надавати послідовно заряди $q, 2q, \dots, nq$, збільшуючи загальний заряд, то його потенціал буде зростати.

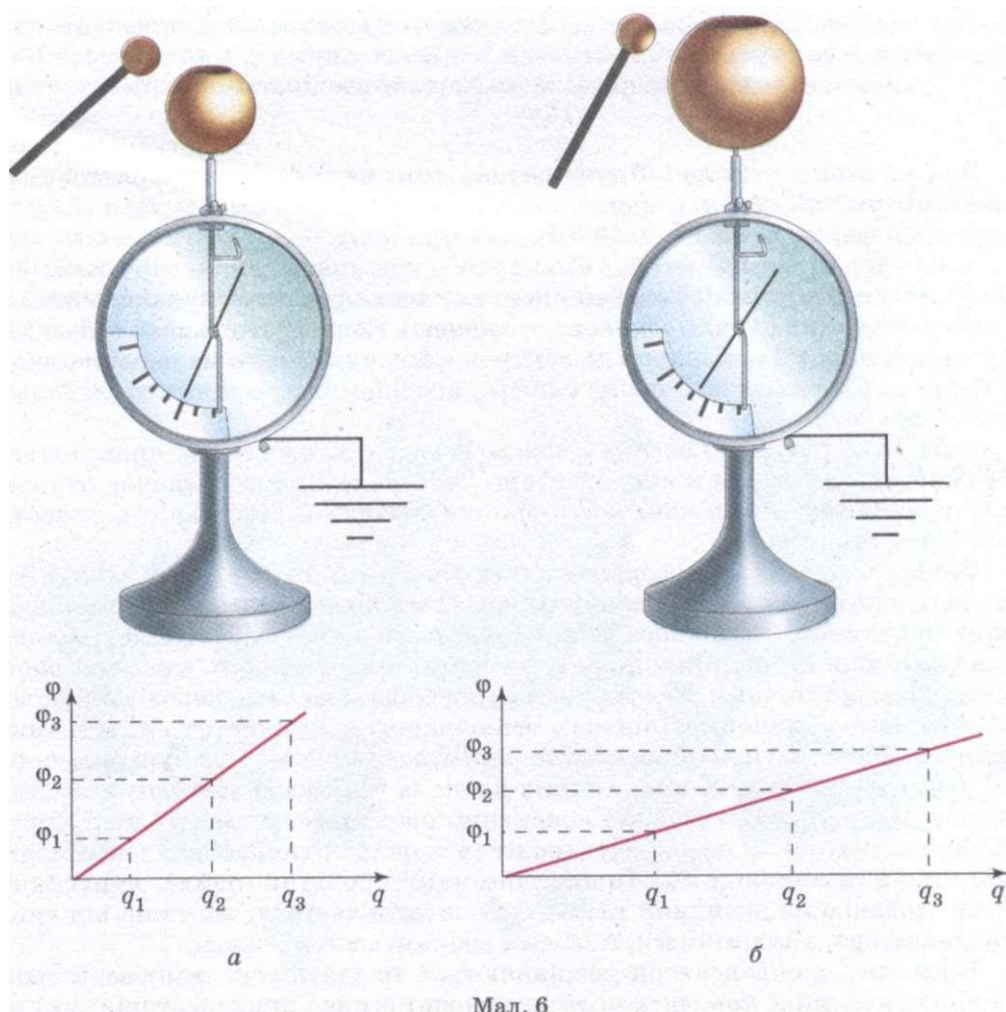
Дослідимо, від чого залежить потенціал зарядженого тіла. Для цього скористаємося двома електрометрами, корпуси яких заземлені. На стержнях електрометрів закріпимо металеві порожнисті кулі різного діаметра (мал. 6). Зарядимо металеву кульку на ізоляційній ручці від високовольтного перетворювача або електрофорної машини і почнемо вносити її у порожнину меншої за діаметром кулі (мал. 6, а), аж доки не торкнемося нею внутрішньої поверхні кулі. Весь заряд з кульки перейде на зовнішню поверхню кулі, електрометр покаже певне значення потенціалу. Проробивши аналогічний дослід з більшою кулею (мал. 6, б), ми побачимо, що стрілки обох електрометрів відхиляються, але кут відхилення у них буде різний. Знову зарядимо кульку і перенесемо порцію заряду на порожнисті кулі, їхні заряди збільшаться вдвічі, а електрометри покажуть збільшення потенціалу. Якщо будемо і далі повторювати

такі дії кілька разів, то спостерігатимемо відповідне зростання потенціалів куль. Потенціал куль буде пропорційний значенню їх заряду, що можна відобразити відповідними графіками. Але потенціал більшої кулі буде зростати повільніше, ніж меншої. Отже, графіки залежності потенціалу куль від заряду будуть різними. Проаналізувавши результати досліду та графіки (мал. 6, а, б), можна зробити висновки: потенціал кожної кулі прямо пропорційний її заряду; коефіцієнт пропорційності для різних куль має різні значення.

Отже, відношення заряду провідника до його потенціалу для різних куль буде різним. Це відношення називають *електроємністю* провідника.

Електроємністю провідника називають величину, яка визначається відношенням заряду провідника q до його потенціалу φ :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$



Мал. 6

Проаналізувавши виконані досліди та отримане рівняння, можна сказати, що електроємність кулі більшого діаметра більша. У XVII—XVIII ст. електрику уявляли собі як аналог рідини, що може «вливатися» у провідник і «вилитися» із нього. З цих уявлень стає зрозумілим походження терміну «електроємність». Електроємність провідника залежить від його розмірів і форми, не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми і розмірів порожнин всередині провідника. Це пояснюється тим, що надлишок зарядів розподіляється лише на зовнішній поверхні провідника. Електроємність провідника не залежить також ні від заряду, розташованого на провіднику, ні від його потенціалу, але залежить від їх співвідношення. Сказане не суперечить формулі, оскільки вона лише показує, що потенціал провідника прямо пропорційний його заряду і обернено пропорційний до електроємності.

Одиницею електроємності є **1 фарад (1 Ф)**. Ця одиниця названа на честь англійського фізика М. Фарадея, який зробив значний внесок у вивчення електричних явищ.

Тіло має ємність 1 фарад, якщо зі зміною його заряду на 1 кулон потенціал змінюється на 1 вольт:

$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}.$$

Значення ємності тіла 1 Ф дуже велике, тому на практиці використовують одиниці ємності, кратні фараду:

$$1 \text{ мікрофарад} = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф.}$$

$$1 \text{ пікофарад} = 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Велику електроємність мають системи з двох провідників, які називають *конденсаторами* (з лат. *condense* — згущую). Конденсатор являє собою два провідники, розділені шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників. У цьому випадку провідники називають *обкладками конденсатора*.

Слід зазначити, що основна класифікація конденсаторів проводиться за типом діелектрика в конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, величину втрат тощо.

За видом діелектрика розрізняють: *вакуумні конденсатори* (обкладки без діелектрика знаходяться у вакуумі), *конденсатори з газоподібним і рідким діелектриком*, *конденсатори з твердим неорганічним діелектриком* (скляні, слюдяні, керамічні, тонкошарові з неорганічних плівок), *конденсатори з твердим органічним діелектриком* (паперові, металопаперові, плівкові, комбіновані — паперовоплівкові, тонкошарові з органічних синтетичних плівок), *електролітичні і оксидно-напівпровідникові*. Такі конденсатори відрізняються від усіх інших типів перш за все своєю великою ємністю. Як діелектрик використовують оксидний шар на металевому аноді. Друга обкладка (катод) — це або електроліт (в електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (в оксидно-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар. Анод виготовляється, залежно від типу конденсатора, з алюмінієвої, ніобієвої або танталової фольги.

Крім того, конденсатори розрізняються за здатністю змінювати свою ємність: *постійні конденсатори* — основний клас конденсаторів, які не

змінюють своєї ємності, *змінні конденсатори* — конденсатори, що можуть змінювати ємність у процесі функціонування апаратури (керування ємністю здійснюється механічно, електричною напругою (варіконди, варікапи) і температурою (термоконденсатори)), *підстроювальні конденсатори* — конденсатори, ємність яких змінюється під час разового або періодичного регулювання і не змінюється у процесі функціонування апаратури. На мал. 7 зображені конденсатори різного типу.

Найпростішим конденсатором — *плоским конденсатором* — є система із двох плоских провідних пластин, розміщених паралельно одна одній на малій порівняно з розмірами пластин відстані і розділених шаром діелектрика.

Електричне поле плоского конденсатора в основному зосереджене між пластинами (мал. 8), але біля країв пластин і у навколишньому середовищі також виникає порівняно слабе електричне поле, яке називають полем розсіювання. У багатьох задачах наближено можна нехтувати полем розсіювання і вважати, що електричне поле плоского конденсатора цілком зосереджене між його обкладками (мал. 9).

З урахуванням розмірів обкладок плоского конденсатора і відстані між ними, електроємність плоского конденсатора буде визначатися так:

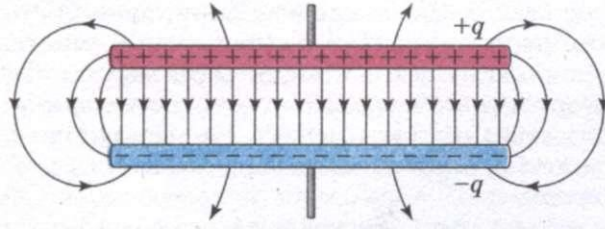
$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

де C — електроємність плоского конденсатора, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ (електрична стала), ϵ — діелектрична проникність, S — площа обкладки конденсатора, d — відстань між обкладками конденсатора.

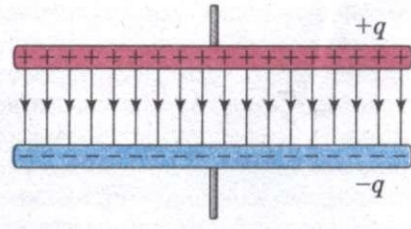
Щоб одержати потрібну електроємність, конденсатори з'єднують у батареї.



Мал. 7



Мал. 8



Мал. 9

Під час паралельного з'єднання конденсаторів (мал. 10) напруги на конденсаторах однакові: $U_1 = U_2 = U$, а заряди дорівнюють $q_1 = C_1 U$ і $q_2 = C_2 U$. Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор електроємністю C , заряджений зарядом $q = q_1 + q_2$ при напрузі між обкладками, що дорівнює U . Звідси випливає

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} \text{ або } C = C_1 + C_2.$$

Таким чином, під час паралельного з'єднання конденсаторів їх електроємності додаються.

Якщо конденсатори з'єднати послідовно (мал. 11), то однаковими виявляться заряди обох конденсаторів: $q_1 = q_2 = q$, а напруги на них дорівнюють $U_1 = \frac{q_1}{C}$ і $U_2 = \frac{q_2}{C}$. Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор, заряджений зарядом q при напрузі між обкладками $U_1 + U_2 = U$. Отже,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ або } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

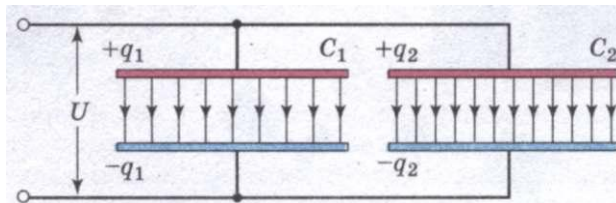
Під час послідовного з'єднання конденсаторів додаються їхні обернені електроємності.

Формули для паралельного і послідовного з'єднання залишаються справедливими для будь-якого числа конденсаторів, з'єднаних у батарею.

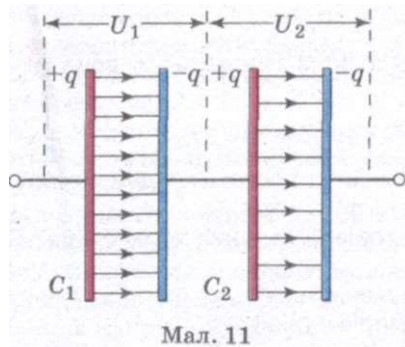
На практиці використовується також змішане з'єднання конденсаторів. Досліди показують, що заряджений конденсатор містить запас енергії.

Енергія зарядженого конденсатора дорівнює роботі зовнішніх сил, яку необхідно затратити, щоб зарядити конденсатор.

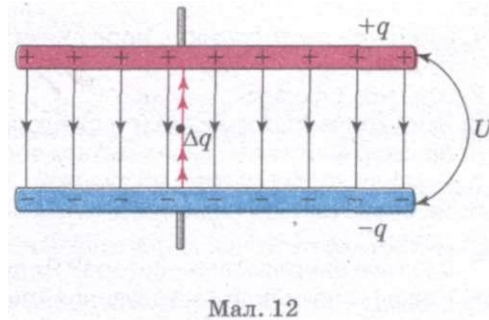
Процес зарядки конденсатора можна уявити як послідовне перенесення досить малих порцій заряду $\Delta q > 0$ з однієї обкладки на іншу (мал. 12).



Мал. 10



Мал. 11



Мал. 12

У цей же час одна обкладка поступово заряджається позитивним зарядом, а інша — негативним. Оскільки кожна порція переноситься в умовах, коли на обкладках вже є деякий заряд q а між ними існує деяка різниця потенціалів $U = \frac{q}{C}$, то при перенесенні кожної порції Δq зовнішні сили повинні виконати

$$\text{роботу } \Delta A = U \Delta q = \frac{q \Delta q}{C}.$$

Після закінчення процесу зарядки енергія W_e конденсатора ємністю C , зарядженого зарядом q , визначиться за формулою

$$W_e = A = \frac{q^2}{2C}.$$

Якщо врахувати співвідношення $q = CU$, то формулу, яка виражає енергію зарядженого конденсатора, можна записати в іншій еквівалентній формі:

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}.$$

Електричну енергію W_e слід розглядати як потенціальну енергію, що накопичилася в зарядженому конденсаторі.

Конденсатори знаходять своє застосування в усіх галузях електротехніки. Вони використовуються для побудови різних електричних кіл з частотно-залежними властивостями, зокрема, фільтрів, кіл зворотного зв'язку, коливальних контурів тощо.

Під час швидкого розрядження конденсатора можна отримати імпульс великої потужності, наприклад, у фотоспалахах, електромагнітних прискорювачах, імпульсних лазерах з оптичною накачкою.

Якщо конденсатор може довгий час зберігати заряд, то його можна використовувати як елемент пам'яті або пристрій зберігання електричної енергії.

Конденсатори використовуються як вимірювальні перетворювачі, а саме: у вимірювальному перетворювачі малих переміщень (мала зміна відстані між обкладками дуже помітно впливає на ємність конденсатора), у вимірювальному перетворювачі вологості повітря, деревини (зміна складу діелектрика приводить до зміни ємності).

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке електроємність провідника? Від чого вона залежить? Як вона визначається?
2. Що таке 1 фарад?
3. Який конденсатор називається плоским?
4. За якою формулою визначається електроємність плоского конденсатора?
5. Які види конденсаторів ви знаєте?
6. Як визначається електроємність конденсаторів, з'єднаних паралельно? Послідовно?
7. Що таке енергія конденсатора? Як вона визначається?
8. Наведіть приклади застосування конденсаторів у техніці.

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. В однорідному електростатичному полі на однаковій відстані від двох пластин розміщені електрон і протон. Чи з однаковою швидкістю вони досягнуть пластин?

Розв'язання

Більшу швидкість матиме електрон, тому що внаслідок меншої маси він набуває значно більшого прискорення.

2. Позитивну обкладку конденсатора електроємністю $C_1 = 1$ мкФ з'єднали з позитивною обкладкою конденсатора, електроємність якого $C_2 = 2$ мкФ, а негативну — з негативною. Визначте різницю потенціалів U на затискачах такої батареї конденсаторів, якщо до з'єднання напруга на першому конденсаторі була $U_1 = 300$ В, а на другому $U_2 = 150$ В.

Розв'язання

Заряд першого конденсатора дорівнював до з'єднання $q_1 = C_1 U_1$, а після з'єднання $q_{1к} = C_1 U$. Відповідно заряд другого конденсатора $q_{2к}$ був до з'єднання $q_2 = C_2 U_2$, а після з'єднання $q_{2к} = C_2 U$. Оскільки з'єднано однойменно заряджені обкладки, то за законом збереження заряду $q_{1к} + q_{2к} = q_1 + q_2$.

$$\text{Звідси } U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}.$$

Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $U = 200$ В.

Рівень А

1. Чому лінії напруженості електричного поля не перетинаються?
2. Зобразіть картину ліній напруженості електричного поля між двома зарядами у випадках: а) $q_1 - q$; б) $q_1 q$; в) $q_1 2q$.
3. Заряд $0,1$ мкКл перебуває в електричному полі у точці напруженістю 5 Н/Кл. Яка сила діє на цей заряд?
4. У деякій точці поля на заряд 2 нКл діє сила $0,4$ мкН. Визначте напруженість поля у цій точці.
5. Яке значення точкового заряду, на який однорідне електричне поле напруженістю 600 кН/Кл діє із силою $0,3$ мН?
6. Визначте напруженість поля заряду 36 нКл у точках, віддалених від нього на 9 і 18 см.
7. На якій відстані від заряду $1 \cdot 10^{-8}$ Кл напруженість поля дорівнює 300 Н/Кл?

8. Визначте заряд, що створює електричне поле, якщо на відстані 5 см від заряду напруженість поля становить $1,5 \cdot 10^5$ Н/Кл.
9. Ємність конденсатора дорівнює 40 пФ. Виразіть цю ємність у фарадах та мікрофарадах.
10. Відокремленому провіднику надали заряд $1 \cdot 10^{-9}$ Кл, зарядивши його до потенціалу 100 В. Визначте електроємність провідника у фарадах, мікрофарадах і пікофарадах.
11. На конденсаторі написано: 100 пФ; 300 В. Чи можна використати цей конденсатор для накопичення заряду 50 нКл?
12. Яку ємність має конденсатор, якщо під час його заряджання до напруги 1,4 кВ він дістав заряд 28 нКл?
13. До якої напруги зарядили конденсатор ємністю 20 мкФ, якщо він дістав заряд 4 мКл?
14. Найбільша ємність шкільної демонстраційної батареї конденсаторів 58 мкФ. Який заряд вона накопичить, якщо її приєднати до полюсів джерела струму напругою 50 В?
15. Як зміниться електроємність шкільного розсувного конденсатора, якщо збільшити відстань між його пластинами?
16. Площа пластин слюдяного конденсатора 15 см^2 , а відстань між пластинами 0,02 см. Яку ємність має конденсатор?
17. Пластини конденсатора мають площу по 10 см^2 . Яка товщина діелектрика (слюди) між ними, коли ємність конденсатора становить 500 пФ?
18. Визначте енергію конденсатора, якщо його ємність 0,25 мкФ, а різниця потенціалів між пластинами 400 В. Який заряд має конденсатор?
19. Ємність конденсатора 6 мкФ, а заряд $3 \cdot 10^{-4}$ Кл. Визначте енергію електричного поля конденсатора.
20. Заряд конденсатора $3,2 \cdot 10^{-8}$ Кл, напруга на обкладках 500 В. Визначте енергію електричного поля конденсатора.

Рівень В

21. Визначте напруженість електричного поля в точці, віддаленій на відстань 10 см від точкового заряду, якщо в точці, віддаленій від нього на 5 см, напруженість дорівнює 40 В/м.
22. Відстань між двома точковими зарядами $+1 \cdot 10^{-7}$ і $-5 \cdot 10^{-8}$ Кл дорівнює 10 см. Яка напруженість поля, створеного цими зарядами, у точці, що знаходиться посередині між ними?
23. Негативний заряд -30 нКл і позитивний заряд 20 нКл знаходяться на відстані 1 м один від одного. В якій точці напруженість електричного поля дорівнює нулю?
24. Два однакові точкові заряди по 3 нКл кожний розміщені на відстані 6 см один від одного. Визначте напруженість поля у точці, що перебуває на відстані 5 см від кожного із зарядів.
25. Напруженість поля між двома горизонтально розміщеними пластинами дорівнює $6 \cdot 10^3$ Н/Кл. У полі цих пластин зависла заряджена пилінка масою $3 \cdot 10^{-8}$ г. Який заряд пилінки?
26. Наблизьте палець до кульки зарядженого електроскопа. Листочки зійдуться. Заберіть палець — і листочки знову розійдуться. Як пояснити це явище?
27. Конденсатор невідомої ємності C зарядили до напруги 100 В. Потім його з'єднали паралельно із незарядженим конденсатором ємністю 5 мкФ. При цьому напруга на першому конденсаторі зменшилась на 25 В. Визначте ємність C .
28. З якою силою взаємодіють пластини плоского конденсатора площею 100 см^2 , якщо різниця потенціалів між ними 500 В, а відстань 3 мм?

29. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 1 см, заряджено до напруги 200 В. Якою буде напруга на конденсаторі, якщо його пластини розсунути до 10 см?
30. Визначте заряд плоского конденсатора ємністю 0,04 мкФ, якщо напруженість поля в конденсаторі 320 В/см, а відстань між пластинами 2 мм.
31. У скільки разів зміниться енергія конденсатора, якщо напругу на ньому збільшити в 4 рази?
32. Площа кожної з пластин плоского конденсатора становить 200 см^2 , а відстань між ними дорівнює 1 см. Визначте енергію поля, якщо напруженість 500 кВ/м.
33. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його пластинами розмістити провідну пластинку, товщиною якої можна знехтувати? Як буде впливати на ємність конденсатора місце розташування розміщеної пластинки? Чи буде впливати на зміну ємності товщина розміщеної пластинки?
34. Пластини плоского повітряного конденсатора площею 5 притягуються із силою P . Визначте заряд конденсатора.
35. Плоский повітряний конденсатор із площею пластин S і відстанню між пластинами d заряджено до напруги U , після чого від'єднано від джерела. Яку роботу треба виконати, щоб розсунути пластини до відстані s ?

§ 5.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО. З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що електричним струмом називають упорядкований (напрявлений) рух заряджених частинок. Електричний струм виникає, коли впорядковано переміщуються вільні електрони у металі або йони в електролітах і т.д. Але, якщо переміщати нейтральне в цілому тіло, то, незважаючи на впорядкований рух величезної кількості електронів і атомних ядер, електричний струм не виникає. Повний заряд, який переноситься через будь-який переріз провідника, дорівнюватиме нулю, бо заряди різних знаків переміщуються з однаковою середньою швидкістю.

Електричний струм має певний напрям. *За напрям струму беруть напрям руху позитивно заряджених частинок.* Якщо струм утворився рухом негативно заряджених частинок, то напрям струму вважають протилежним напрямку руху частинок. Розрізняють постійний і змінний струми. При постійному струмі через провідник у будь-якій його ділянці з часом протікає однаковий за значенням заряд і в одному напрямі. Для існування електричного струму в певному середовищі повинні виконуватися такі умови: 1) наявність вільних носіїв заряду (електронів, йонів тощо); 2) наявність у середовищі причин, внаслідок яких вільні заряджені частинки переміщуються в певному напрямі, наприклад, наявність електричного поля; 3) наявність замкненого кола.

Струм, якщо він існує, обов'язково призводить або до виникнення магнітного поля, або до нагрівання провідника, або до зміни його структури.

Ви вже знаєте, що будь-який заряджений провідник має певний потенціал і в усіх точках його поверхні цей потенціал однаковий. *Коли ж у провіднику існує струм, то потенціал у його різних точках не буде однаковим — він зменшується (спадає) у напрямі струму.*

У провідниках майже завжди потрібно підтримувати струм протягом тривалого часу, тобто на їхніх кінцях різниця потенціалів не повинна зменшуватись. Пристрої, в яких відбувається розділення заряджених частинок, за рахунок чого і підтримується необхідна різниця потенціалів, називаються *джерелами струму*. Сили, які діють у джерелі струму, переносять заряд від точок з меншим потенціалом до точок з більшим потенціалом, виконуючи у цей час роботу. Отже, джерело струму є джерелом енергії. Напругу на кінцях джерела (різницю потенціалів) ще називають енергетичною характеристикою струму. У гальванічних елементах і акумуляторах в електричну енергію перетворюється енергія хімічних взаємодій, у термогенераторах — теплова енергія тощо.

Електричні кола, в яких підтримується струм і використовуються його властивості, складаються з джерела струму, споживачів (нагрівники, освітлювальні прилади, електродвигуни тощо), вимірювальних і регулювальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками.

Кількісною характеристикою електричного струму є його сила / і густина j .
Силою струму називається величина, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

де Δq — заряд, що переноситься вільними носіями заряду через поперечний переріз провідника, Δt — інтервал часу перенесення заряду. Вона вказує, скільки заряджених частинок пройшло через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Густина струму — векторна фізична величина, її модуль визначається відношенням сили струму I до площі поперечного перерізу провідника S :

$$j = \frac{I}{S}$$

При рівномірному розподілі густини струму по поперечному перерізу провідника сила струму буде визначатися так:

$$I = jS = q_0 n v S,$$

де q_0 — заряд частинки, n — кількість частинок в одиниці об'єму, v — середня швидкість напрямленого руху частинок, S — площа поперечного перерізу провідника.

Для створення й існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) — позитивно або негативно заряджених частинок, не зв'язаних в єдину електрично нейтральну систему, і сили, що створює і підтримує їх упорядкований рух. Як правило, такою силою є сила з боку електричного поля всередині провідника, яке визначається електричною напругою на кінцях провідника.

Для того, щоб струм був тривалим, енергія електричного поля повинна весь час поповнюватися, тобто, потрібен такий пристрій, в якому певний вид енергії безперервно перетворюється на енергію електричного поля. Такий пристрій називається джерелом електрорушійної сили або джерелом струму.

Для отримання електричного струму необхідно створити електричне коло, яке складається з джерела струму, споживачів електричної енергії,

вимірювальних і регульовальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками. Коло повинно бути замкнене.

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що сила струму на ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі і обернено пропорційна до опору цієї ділянки: $I = \frac{U}{R}$. Нагадаємо, що опір характеризує здатність провідника

протидіяти напрямленому руху заряджених частинок. Вперше цю залежність сили струму від напруги й опору у 1827 р. встановив німецький вчений Г. Ом. На його честь її називають законом Ома для ділянки кола. Іноді формулу для закону Ома записують так:

$$U = IR.$$

Добуток IV називають *спадом напруги* на даній ділянці кола. Якщо вона не містить джерела струму, то поняття напруги і спаду напруги збігаються.

Електрична енергія від джерела струму передається по проводах споживачам: електродвигунам, лампам, нагрівальним приладам, телевізорам, радіоприймачам тощо. За допомогою з'єднувальних провідників і вимикачів у електричне коло часто вмикають також вимірювальні прилади: амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники електричної енергії тощо.

Найпоширенішими і найпростішими типами з'єднання провідників є *послідовне* і *паралельне* з'єднання.

При послідовному з'єднанні електричне коло не має розгалужень. Усі провідники ввімкнено в коло по черзі, один за одним. На мал. 13 показано послідовне з'єднання двох провідників, опори яких R_1 і R_2 (наприклад, з двома лампочками, двома обмотками електродвигуна тощо).

Сила струму в обох провідниках однакова:

$$I_1 = I_2 = I,$$

оскільки в провідниках під час проходження постійного струму електричний заряд не накопичується, і через будь-який переріз провідника за певний інтервал часу проходить один і той самий заряд.

Напруга (або різниця потенціалів) на кінцях розглядуваної ділянки кола складається з напруг на першому і другому провідниках:

$$U = U_1 + U_2.$$

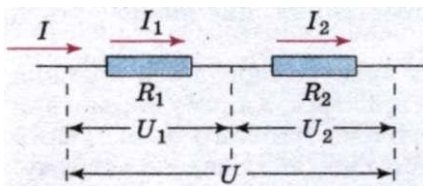
Застосувавши закон Ома для всієї ділянки в цілому і для ділянок з опором R_1 і R_2 , можна довести, що повний опір послідовному з'єднанні такий:

$$R = R_1 + R_2.$$

Аналогічна формула застосовна для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.

Напруги на провідниках і їхні опори в разі послідовного з'єднання зв'язані співвідношенням:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$



Мал. 13

На мал. 14 показано паралельне з'єднання двох провідників, опори яких R_1 і R_2 . У цьому випадку електричний струм I розгалужується на дві частини. Силу струму в першому і другому провідниках

позначимо I_1 і I_2 . Оскільки в точці A — розгалуженні провідників (таку точку називають вузлом) — електричний заряд не накопичується, то заряд, що надходить за одиницю часу у вузол, дорівнює заряду, що виходить з вузла за той самий час. Отже,

$$I = I_1 + I_2.$$

Напруга U на провідниках, з'єднаних паралельно, одна і та сама.

В освітлювальній мережі підтримується напруга 220 В. На цю напругу розраховані прилади, що використовують електричну енергію. Тому паралельне з'єднання — найпоширеніший спосіб з'єднання різних споживачів. У цьому випадку вихід з ладу одного приладу не впливає на роботу інших, тоді як при послідовному з'єднанні вихід з ладу одного приладу розмикає все коло.

Застосовуючи закон Ома для ділянок з опорами R_1 і R_2 , можна довести, що величина, обернена до повного опору ділянки AB , дорівнює сумі величин, обернених до опорів окремих провідників:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Звідси

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

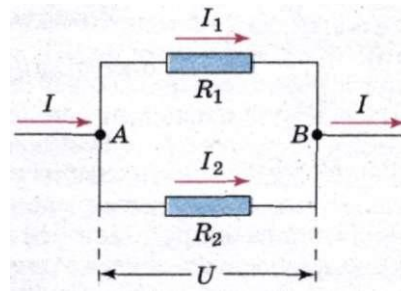
Вказані формули можна застосувати до паралельного з'єднання будь-якої кількості провідників.

Сили струму в провідниках і їхні опори у випадку паралельного з'єднання зв'язані співвідношенням:

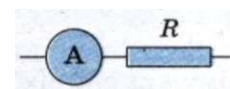
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

На практиці, щоб виміряти силу струму в провіднику, амперметр вмикають послідовно цьому провіднику (мал. 15). Але треба мати на увазі, що сам амперметр має деякий опір R_a . Тому опір ділянки кола з увімкнутим амперметром збільшується, і при незмінній напрузі сила струму зменшується згідно із законом Ома. Щоб амперметр якомога менше впливав на силу струму, який вимірюють, його опір роблять дуже малим. Це слід пам'ятати і ніколи не намагатися «виміряти силу струму» в освітлювальній мережі, вмикаючи амперметр у розетку. Станеться коротке замикання. Сила струму при малому опорі приладу досягне такого великого значення, що обмотка амперметра згорить.

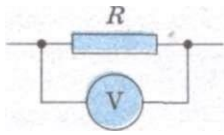
Щоб виміряти напругу на ділянці кола з опором i ?, до нього паралельно вмикають вольтметр. Напруга на вольтметрі збігатиметься з напругою на ділянці кола (мал. 16).



Мал. 14



Мал. 15



Мал. 16

Якщо опір вольтметра R_v , то після його вмикання в коло опір ділянки вже буде не R , а $R = \frac{RR_v}{R+R_v} < R$.

Тому напруга, яку вимірюють на ділянці кола, зменшиться. Щоб вольтметр помітно не спотворював вимірюваної напруги, його опір має бути набагато більшим порівняно з опором ділянки кола, на якій вимірюється напруга. Вольтметр можна вмикати в коло, не ризикуючи, що він згорить, якщо він розрахований на напругу, яка перевищує напругу в мережі.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке електричний струм? Який його напрям?
2. Які є види електричного струму?
3. По чому можна судити про наявність струму в провіднику?
4. Як визначається сила струму, що тече через поперечний переріз провідника?
5. Назвіть умови створення й існування електричного струму в колі.
6. Запишіть закони послідовного і паралельного з'єднання провідників.
7. Чому опір амперметра має бути малим, а опір вольтметра — великим?

§6.

РОБОТА ТА ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

При впорядкованому русі заряджених частинок у провіднику електричне поле виконує роботу. Цю роботу прийнято називати **роботою струму**.

Якщо розглядати довільну ділянку електричного кола — однорідний провідник: нитку лампи розжарення, резистор, обмотку електродвигуна тощо, то можна з'ясувати, що за інтервал часу Δt через поперечний переріз провідника S проходить заряд Δq . Тоді електричне поле виконує роботу $A = \Delta q U$. Оскільки сила струму $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то ця робота визначається за формулою:

$$A = IU\Delta t,$$

де I — сила струму в колі; U — напруга на ділянці кола; Δt — інтервал часу, протягом якого виконувалася робота.

Робота електричного струму на ділянці кола визначається добутком сили струму, напруги та інтервалу часу, протягом якого ця робота виконувалася.

Згідно із законом збереження енергії ця робота має дорівнювати зміні енергії розглядуваної ділянки кола. Тому енергія, яка виділяється на даній ділянці кола за інтервал часу Δt , дорівнює роботі електричного струму: $A = IU\Delta t$.

Якщо на ділянці кола не виконується механічна робота і струм не чинить хімічних дій, відбувається тільки нагрівання провідника, який віддає теплоту навколишньому середовищу.

Як же це відбувається? Відомо, якщо електрон потрапляє в електричне поле, то він починає рухатися з прискоренням. Після зіткнення з йонами кристалічної ґратки електрони передають йонам свою енергію, і внаслідок цього енергія хаотичного руху йонів біля положень рівноваги зростає. Це свідчить про збільшення внутрішньої енергії провідника, температура якого підвищується, і він починає передавати теплоту навколишнім тілам. Через невеликий інтервал часу після замикання кола процес установлюється і температура з часом перестає змінюватися. До провідника за рахунок роботи електричного поля безперервно надходить енергія, його внутрішня енергія залишається незмінною, оскільки провідник передає навколишнім тілам кількість теплоти, яка дорівнює роботі електричного струму. Отже, співвідношення $A = IU\Delta t$ для роботи струму у випадку однорідного провідника визначає кількість теплоти, що передається провідником іншим тілам.

Якщо у формулі $A = IU\Delta t$ напругу записати через силу струму або силу струму через напругу, скориставшись законом Ома для ділянки кола, то отримаємо три еквівалентні формули для роботи електричного струму:

$$A = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q.$$

Формулу $A = I^2 R \Delta t$ зручно використовувати для кола з послідовним з'єднанням провідників, тому що сила струму в усіх провідниках однакова.

При паралельному з'єднанні краще використовувати формулу $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$, тому що напруга на всіх провідниках однакова.

Закон, що визначає кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом у навколишнє середовище, вперше експериментально встановили англійський учений Дж. Джоуль і російський учений Е. Х. Ленц, тому він і отримав назву — закон Джоуля—Ленца:

кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника та інтервалу часу проходження струму по провіднику:

$$Q = I^2 R \Delta t,$$

де Q — кількість теплоти, що виділилася у провіднику; I — сила струму в провіднику; R — електричний опір провідника; Δt — інтервал часу проходження струму по провіднику.

Закон Джоуля—Ленца виведено із закону збереження енергії. Формула $A = I^2 R \Delta t$ дає змогу визначити кількість теплоти, що виділяється на будь-якій ділянці електричного кола, яке складається з будь-яких провідників.

Будь-який споживач електричного струму (лампочка, електродвигун, електродзвінок тощо) розрахований на використання певної енергії за одиницю часу. Тому разом з роботою струму важливе значення має поняття *потужності електричного струму*.

Потужність електричного струму визначається відношенням роботи струму за інтервал часу Δt до цього інтервалу часу:

$$P = \frac{A}{\Delta t},$$

Цей вираз для потужності можна подати в кількох еквівалентних формах, використовуючи закон Ома для ділянки кола:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Для більшості електроприладів зазначено потужність, яку вони споживають, на корпусі або в технічних паспортах.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають роботою електричного струму? За якими формулами вона визначається?
2. Як зв'язана робота електричного струму з потужністю споживача струму?
3. Як можна визначити потужність струму?

§ 7.

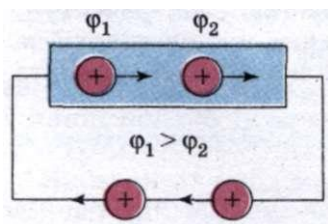
ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

Якщо у провіднику існує електричне поле, але не створені умови для його підтримки, то переміщення носіїв струму (електронів, йонів) за короткий час призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться.

Як вам уже відомо, за напрям струму взято напрям руху позитивно заряджених носіїв. Вони рухаються в напрямі напруженості поля в провіднику, тобто в бік зменшення потенціалу.

Переміщення носіїв струму в провіднику без підтримки електричного поля приводить до вирівнювання потенціалів уздовж провідників. Тому для того, щоб підтримувати струм тривалий час, треба від кінця провідника з меншим потенціалом (носії струму вважаються позитивно зарядженими) безперервно відводити заряди, які приносяться до цього кінця провідника струмом, а до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити. Іншими словами, необхідно здійснити кругообіг зарядів, щоб вони рухалися замкненим контуром (мал. 17).

Здійснити такий рух носіїв струму тільки за наявності електростатичного поля не можна. Адже рух позитивно заряджених носіїв струму від кінця провідника з меншим потенціалом до кінця провідника з більшим потенціалом відбувається проти дії кулонівських сил — сил електростатичного поля. Отже, у замкненому колі повинні бути ділянки, де перенесення позитивних зарядів відбувається



Мал. 17

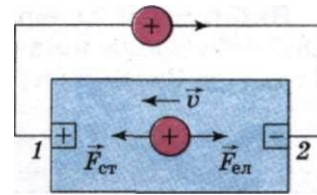
проти сил електростатичного поля. Переміщення носіїв заряду на цих ділянках можливе лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які мають назву — *сторонні сили*.

Таким чином, для підтримки струму потрібні сторонні сили, що діють або в усьому колі, або на окремих його ділянках. Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами, дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі або через межу між двома різнорідними речовинами, електричними

або неелектростатичними полями, які породжуються змінними у часі магнітними полями.

Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку вони виконують над зарядами, що переміщуються по колу.

Величина, яка визначається роботою сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом, називається **електрорушійною силою (ЕРС)**, що діє в колі або на його ділянці.



Мал. 18

Позначається ЕРС літерою \mathcal{E} . Тоді $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$. Одиницею ЕРС у СІ є 1 вольт

$$(1 \text{ В}): 1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

У визначенні ЕРС можна говорити про ту ділянку кола, де діють сторонні сили, а також можна говорити про все замкнене коло. Ці визначення еквівалентні.

Дійсно, під час руху зарядів між полюсами джерела у зовнішньому колі роботу виконують тільки електростатичні сили $\vec{F}_{\text{ел}}$. У внутрішній частині кола роботу виконують як електростатичні, так і сторонні сили $\vec{F}_{\text{ст}}$ (мал. 18). При цьому робота електростатичних сил $A^{1/2}$ у зовнішньому колі дорівнює роботі електростатичних сил $A_{2,1}$ між тими самими полюсами всередині джерела, взятої з протилежним знаком: $A_{1,2} = -A_{2,1}$. Повна робота у всьому колі складається із суми робіт електростатичних сил у зовнішній ділянці кола і сил у внутрішній ділянці. Остання складається з роботи електростатичних сил $A_{2,1}$ і роботи сторонніх сил $A_{\text{ст}}$: $A = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{\text{ст}} = A_{\text{ст}}$.

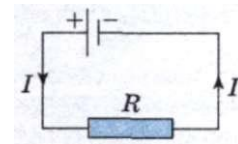
Повна робота всіх сил у повному колі дорівнює роботі тільки сторонніх сил, де вони діють.

Сила струму, напруга і ЕРС — величини скалярні. Вони можуть бути як позитивними, так і негативними, залежно від вибору напрямку обходу контуру зі струмом. У випадку збігу напрямку струму з вибраним позитивним напрямком обходу кола сила струму є позитивною (мал. 19). ЕРС джерела позитивна, якщо з вибраним напрямком обходу контуру збігається напрям сторонніх сил у джерелі.

ЕРС зосереджена тільки всередині джерела, а її значення не залежить від сили струму в колі.

Розглянемо найпростіше повне або замкнене коло, яке складається з джерела струму (гальванічного елемента або акумулятора, або генератора струму), споживача струму — резистора опором r (мал. 19). Будь-яке джерело струму має ЕРС \mathcal{E} і опір r , який називають *внутрішнім опором* на відміну від зовнішнього опору R кола. У гальванічних елементах r — це опір розчинів електролітів і електродів, у генераторах струму — опір обмоток.

Покажемо зв'язок сили струму в колі I , ЕРС \mathcal{E} і повного опору $R + r$ кола. Для цього скористаємося законом збереження енергії і законом Джоуля—Ленца: $Q = I^2 R \Delta t$.



Нехай за час Δt через поперечний переріз провідника пройде заряд Δq . Тоді роботу сторонніх сил з переміщення заряду Δq можна визначити так: $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} \Delta q$. Скориставшись визначенням сили струму $\Delta q = I \Delta t$, отримаємо

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t.$$

За рахунок цієї роботи у внутрішній і зовнішній ділянках кола, опори яких r і R , виділяється кількість теплоти, яка за законом Джоуля—Ленца дорівнює

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t.$$

Згідно із законом збереження енергії $A =$ Прирівнявши рівняння $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t$ і $Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t$, отримаємо

$$\mathcal{E} = IR + Ir.$$

Добуток сили струму і опору ділянки кола IR називають *спадом напруги на цій ділянці*. Таким чином, ЕРС \mathcal{E} дорівнює сумі спадів напруг у внутрішній і зовнішній ділянках повного кола.

У замкненому колі постійного струму сума спадів напруг у зовнішній і внутрішній ділянці кола є величиною сталою і дорівнює ЕРС джерела струму.

Перепишемо вираз $\mathcal{E} = IR + Ir$ в іншому вигляді:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

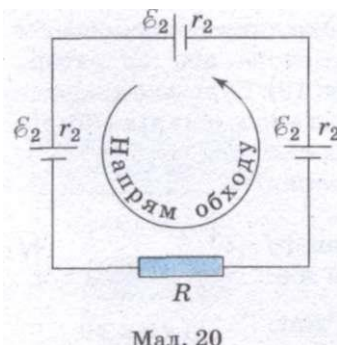
Сила струму в повному колі визначається відношенням ЕРС кола до його повного опору.

Цей закон отримав назву — закон Ома для повного кола.

Таким чином, сила струму в повному колі залежить від трьох величин: ЕРС \mathcal{E} , опору її зовнішньої і опору r внутрішньої ділянок кола. Внутрішній опір джерела струму не впливає помітно на силу струму, якщо він дуже малий порівняно з опором зовнішньої частини кола ($R \gg r$). При цьому напруга на затискачах джерела приблизно дорівнює ЕРС \mathcal{E} : $U = IR \approx \mathcal{E}$.

Проте під час короткого замикання ($R \rightarrow 0$) сила струму в колі визначається саме внутрішнім опором джерела і може досягти при ЕРС \mathcal{E} у кілька вольтів великого значення, якщо опір малий (наприклад, $r \approx 0,1 - 0,001$ Ом). Провідники при цьому плавляться, а джерело виходить з ладу.

Якщо коло містить кілька послідовно з'єднаних елементів, ЕРС яких $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \dots, \mathcal{E}_n$, то повна ЕРС \mathcal{E} кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих елементів. Для визначення знака ЕРС \mathcal{E} будь-якого джерела струму треба спочатку вибрати додатний напрям обходу контуру. На мал. 20 додатним вважається напрям обходу проти руху стрілки годинника.



Мал. 20

Якщо при обході кола переходять від негативного полюса джерела до позитивного, то ЕРС $\mathcal{E} > 0$. Сторонні сили всередині джерела виконують при цьому додатну роботу. Якщо ж при обході кола переходять від позитивного полюса джерела до негативного, то ЕРС $\mathcal{E} < 0$. Сторонні сили всередині джерела виконують від'ємну роботу. Для кола, зображеного на мал. 20, при обході контуру проти

руху стрілки годинника:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Якщо $\mathcal{E} > 0$, то згідно з $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ сила струму $I > 0$, тобто напрям струму

збігається з напрямом обходу контура. При $\mathcal{E} < 0$, навпаки, напрям струму протилежний напрямку обходу контура. Повний опір кола $R_{\text{п}}$ дорівнює сумі всіх опорів:

$$R_{\text{п}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що прийнято за напрям руху струму?
2. Які сили називаються сторонніми?
3. Чим можуть бути обумовлені сторонні сили?
4. Що таке електрорушійна сила?
5. Чому дорівнює повна робота всіх сил у повному колі?
6. Від чого не залежить ЕРС і де вона зосереджена?
7. Що називають спадом напруги у ділянці кола?
8. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
9. Від чого залежить знак ЕРС \mathcal{E} у законі Ома для повного кола?
10. Чому дорівнює повний опір замкненого кола?



Це цікаво знати

До сорока років свого життя **Георг Ом** (він народився 16 березня 1789 року) встиг об'їхати багато міст Німеччини. Весь південний захід — від Мюнхена до Кельна — йому був уже добре відомий.

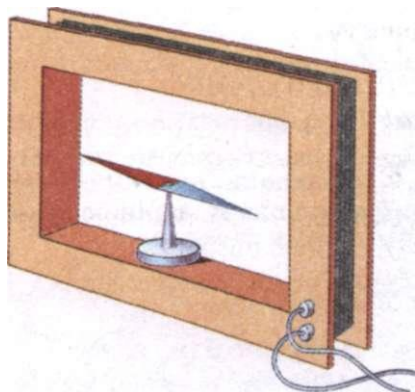
Але Георг Ом не був багатим туристом. Він подорожував з нужди, шукаючи роботу. Будучи сином слюсаря, через нестатки він залишив навчання у вищій школі і взявся за викладацьку роботу. Георг Ом любив фізику і математику, а повинен був викладати в гімназіях грецьку і латинську мови. Лише на дозвіллі він міг цілком віддати себе улюбленим заняттям з фізики.

Ом знав про найновіші відкриття Ерстеда і Ампера. «Як уявити собі електричний струм?» — це було перше питання, на яке протягом кількох років намагався дати ясну відповідь уже немолодий фізик-аматор.

Учителюючи в Кельні, він любив відігнати втому прогулянкою вздовж Рейна. І, хто знає, може, тут, на берегах цієї ріки, Георг Ом знайшов те, що допомогло йому відкрити великий закон.

«Що рухає води Рейна вперед, на північ — в Ессен, Голландію і Північне море? Очевидно, різниця у висоті положення початку і кінця ріки. Що ж примушує проходити по колу електричний струм? Як собі це уявити? Очевидно, один з полюсів гальванічної батареї являє собою ніби вищий рівень електричних зарядів, ніж їх рівень біля другого полюса. І тому електричний струм тече по колу, як вода в річці, від вищих місць до нижчих», — так, мабуть, міркував Ом.

Він знав, що силу водяного потоку легко виміряти. Для цього треба знати кількість води, яка протікає за секунду через поперечний переріз потоку. «А як визначити потік електрики?» — думав Ом. І він знову порівнював електричний струм із водяним потоком, користуючись законами стародавньої науки гідравліки, науки про закони руху рідин. Очевидно, виміряти кількість електрики, яка проходить за одиницю часу, тоб-



Мал. 2і

то за одну секунду, через переріз провідника, це і є визначення сили електричного струму.

Як збільшити силу електричного струму? Для цього, мабуть, треба пропустити через той самий переріз за той самий час — за секунду — більшу кількість електрики. Якби русло Рейна було крутіше, то його води неслися б значно швидше. Те саме, мабуть, відбувається і в гальванічному полі. Різниця електричних рівнів на полюсах батареї — це той напір, який є причиною руху електричного струму, і від величини цього напору залежить сила електричного струму. Назвемо цю різницю висот електричних рівнів, або цей напір, електрорушійною силою батареї.

Завдяки низці міркувань Ом установив три поняття: 1) силу струму — кількість електрики, що проходить через переріз провідника за одну секунду, 2) електрорушійну силу — напір, під яким тече електрика, 3) опір — протидію проходженню струму, що залежить від речовини, довжини, площі поперечного перерізу і фізичного стану речовини провідника.

У той час Ом жив у Берліні, обіймаючи посаду викладача математики Берлінського політехнічного інституту. Він встиг ґрунтовно ознайомитися з працями видатного фізика Фур'є, який встановив закони теплопровідності і помітив значну подібність явищ теплопровідності та електропровідності. Це прискорило відкриття Омом основного закону, названого його ім'ям.

Свої дослідження Ом проводив у лабораторії інституту, вони давалися нелегко. Справа в тому, що сила струму гальванічної батареї із незрозумілих Ому причин не лишалась постійною. Тому він з радістю прийняв пропозицію фізика **Поггендорфа** використати для дослідів нове джерело електрики — термоелемент, який був відкритий незадовго до того. Це джерело давало струм постійної сили. Термоелемент мав досить просту будову, яка базувалася на відкритті **Зеебека**. Між двома мідними дротинами був припаяний стержень із вісмуту. Щоб одержати найбільшу електрорушійну силу термоелемента, Ом опускав один із сплавів у лід, а другий тримав у киплячій воді.

Щоб виміряти силу струму, Ом користувався мультиплікатором — це простий і важливий прилад, який винайшов фізик **Швейгер** (мал. 21), земляк і друг Ома. Мультиплікатор являв собою магнітну стрілку, розміщену всередині кількох витків дроту. Ом спостерігав величину відхилення стрілки мультиплікатора, ввімкненого у гальванічне коло.

Спроби наочно показали, що стрілка мультиплікатора завжди відхиляється тим більше, чим коротший і товщий провідник, що замикає коло.

Стрілка мультиплікатора відхиляється менше, коли цей провідник довший і тонший. Мідний дріт у п'ять разів більшої довжини при одному і тому самому перерізі дає у п'ять разів менше відхилення стрілки мультиплікатора. Якщо ж, наприклад, вставити мідну дротину площею перерізу в десять разів більшою, але тієї самої довжини, тоді сила струму зростає в десять раз. Однакові розміром дротини з різних речовин (міді, заліза і ін.) дали різне відхилення стрілки мультиплікатора.

У 1827 р. було надруковано дослідження під назвою: «Гальванічне коло, математично опрацьоване Г.-С. Омом». У ньому було викладено винайдений Омом закон: «У всякому нерозгалуженому замкненому електричному колі сила струму пропорційна електрорушійній силі і обернено пропорційна до опору всього кола».

3. Перевірити роботу кола, коли ключ розімкнено і замкнено.
4. Виміряти ЕРС джерела струму.
5. Зняти покази амперметра і вольтметра, коли ключ замкнено, і обчислити $\rho_{\text{пр}}$. Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму, використовуючи дані про клас точності приладів.

Для допитливих

1. Чому покази вольтметра при розімкнутому і замкнутому ключі різні?
2. Як підвищити точність вимірювання ЕРС джерела струму?
3. Чи ви можете запропонувати інші способи вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Внаслідок ввімкнення чергового споживача на ділянці, де вольтметром вимірювали напругу, покази його зменшилися. Чому?

Розв'язання

Споживач ввімкнули паралельно ділянці, що зменшило її опір. При постійній силі струму на ділянці зменшення опору призвело до зменшення показів вольтметра.

2. Акумулятор, ЕРС якого 6 В і внутрішній опір 0,1 Ом, живить зовнішнє коло опором 12,4 Ом. Яка кількість теплоти виділиться за 10 хв у всьому колі?

Розв'язання

Згідно із законом Ома для повного кола сила струму в ньому $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$. Кількість теплоти, що виділилася на зовнішній ділянці, визначається за формулою $Q_1 = I^2 R t$, на внутрішній — $Q_2 = I^2 r t$.

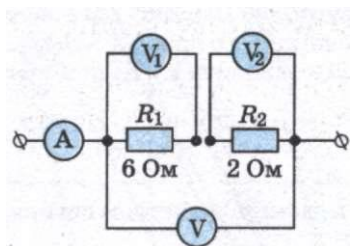
Отже, повна кількість теплоти така:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R+r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R+r}.$$

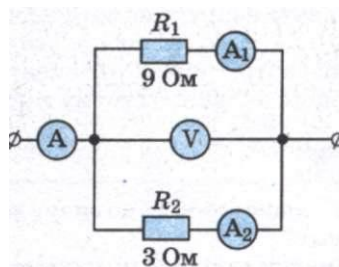
Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $Q = 1728$ Дж.

Рівень А

36. Вольтметр V_1 показує напругу 6 В. Які покази амперметра А і вольтметрів V_2 і V (мал. 23)?
37. Вольтметр показує 0,9 В. Які покази амперметрів A^1 і A^2 (мал. 24)?
38. За графіком залежності сили струму в реостаті від його опору визначте напругу на реостаті (мал. 25).
39. За графіком залежності сили струму в провіднику від напруги обчисліть опір провідника (мал. 26).
40. На електричній плитці з відкритою спіраллю нагрівається чайник. Під час кипіння частину спіралі залило водою. Як змінилося розжарення незалитої частини спіралі?
41. Чому нитка електролампочки сильно розжарюється, а дроти, що підводять струм, залишаються холодними, хоча через лампу і дроти проходить струм однакової сили?
42. В обмотці електродвигуна, опір якої 0,75 Ом, сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

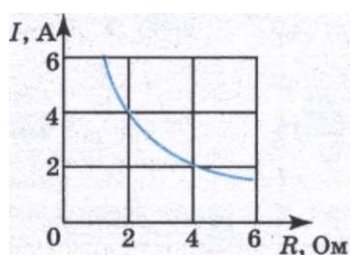


Мал. 23

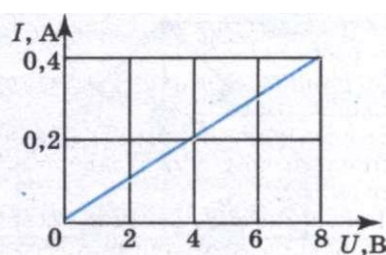


Мал. 24

43. Під час переміщення 20 Кл електрики по провіднику опором 0,5 Ом було виконано роботу в 100 Дж. Визначте час, протягом якого проходив струм.
44. Яку потужність споживає електрична лампочка, увімкнена в мережу з напругою 220 В, якщо опір її нитки в розжареному стані 484 Ом?
45. Електродвигун швейної машини розвиває потужність 40 Вт. Який струм проходить через двигун, якщо він працює при напрузі 127 В? Скільки енергії використовує двигун протягом 1,5 год?
46. Чому при малій швидкості впорядкованого руху електронів у металевому провіднику прилади починають діяти одночасно?
47. Коли через електричну лампочку розжарення проходить струм більшої сили: чи відразу після вмикання її в мережу, чи через кілька хвилин? Чому?
48. Сила струму в металевому провіднику дорівнює 0,8 А, переріз провідника 4 мм^2 . Вважаючи, що в кожному кубічному сантиметрі знаходиться $2,5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів, визначте середню швидкість їх упорядкованого руху.
49. Визначте силу струму в мідному провіднику перерізом 10 мм^2 , якщо середня швидкість упорядкованого руху вільних електронів дорівнює $4,2 \text{ мм/с}$, а їх кількість становить $5 \cdot 10^{24}$.
50. Якщо лампочку живити від елемента, що має ЕРС 1,5 В, то робота сторонніх сил в елементі дорівнюватиме 18 Дж. Визначте заряд, що проходить за цей час через лампочку.
51. Гальванічний елемент з ЕРС 5 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнуто на провідник опором 14 Ом. Яка напруга на кінцях провідника?
52. Яке значення зовнішнього опору, якщо генератор, ЕРС якого 230 В і внутрішній опір 0,1 Ом, подає в зовнішню частину кола напругу 220 В?
53. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначте внутрішній опір джерела і спад напруги на ньому.



Мал. 25

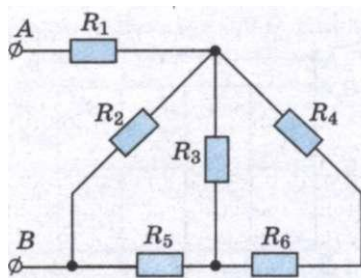


Мал. 26

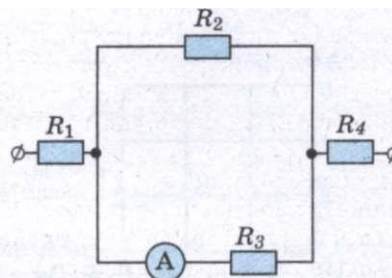
54. Визначте напругу на затискачах джерела струму, що має ЕРС 2 В і внутрішній опір 0,5 Ом, до і після під'єднання до нього зовнішнього опору 4,5 Ом.
55. Який внутрішній опір елемента, якщо його ЕРС становить 1,2 В і при зовнішньому опорі 5 Ом сила струму дорівнює 0,2 А?

Рівень В

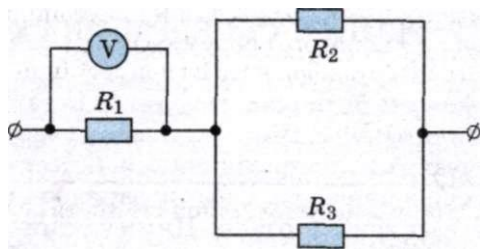
56. Яка основна вимога до опору вольтметра? Чи можна вольтметром виміряти силу струму?
57. Мідний та залізний провідники однакової довжини і перерізу з'єднані і ввімкнені у коло. Чи різняться напруги на провідниках у разі їх послідовного і паралельного увімкнення?
58. Унаслідок обробки провідника методом волочіння його довжина збільшилась у 5 разів, а площа поперечного перерізу в стільки ж разів зменшилась. У скільки разів змінився опір провідника?
59. До мережі з напругою 24 В під'єднали два послідовно з'єднаних резистори. При цьому сила струму стала дорівнювати 0,6 А. Коли резистори з'єднали паралельно, сумарна сила струму стала 3,2 А. Визначте опір резисторів.
60. Два провідники під'єднують до джерела постійної напруги спочатку послідовно, а потім паралельно. Опір одного з провідників в n разів більший від іншого. Як змінюється сила струму в колі?
61. Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників 5 Ом, а паралельно з'єднаних — 1,2 Ом. Визначте опір провідників.
62. Еквівалентний опір трьох паралельно з'єднаних споживачів 300 Ом, а їхні опори відносяться як 1 : 3 : 5. Визначте опір кожного із споживачів.
63. Амперметр із внутрішнім опором 0,72 Ом розраховано на силу струму 0,5 А. Яку максимальну силу струму можна буде виміряти амперметром, якщо паралельно йому під'єднати шунт опором 0,08 Ом?
64. Визначте силу струму в кожному з резисторів (мал. 27), якщо напруга між точками А і В дорівнює 12 В; $R_1 = R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 10$ Ом; $R_4 = 6$ Ом; $R_5 = 3$ Ом; $R_6 = 6$ Ом.
65. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 28), якщо амперметр показує 2 А, $R_1 = 20$ Ом; $R_2 = 10$ Ом; $R_3 = 15$ Ом; $R_4 = 4$ Ом.
66. В и з н а ч і д і л струмів і напруг між опорами (мал. 29), якщо $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 12$ Ом; $R_3 = 3$ Ом; а вольтметр показує 20 В.
67. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 30), якщо амперметр показує 5 А; $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 10$ Ом; $R_3 = 15$ Ом; $R_4 = 4$ Ом.
68. Спираль електричної плитки перегоріла і після з'єднання кінців дроту стала дещо коротшою. Як змінилася кількість теплоти, що виділяється плитою за певний час? Відповідь обґрунтуйте.



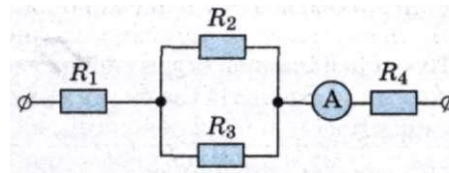
Мал. 27



Мал. 28



Мал. 29



Мал. 30

69. Електричний нагрівник має дві однакові обмотки, які можна вмикати в коло окремо і разом. Як слід з'єднати обмотки, щоб нагрівання відбувалося швидше?
70. Як зміниться кількість теплоти, що виділяється в електрочайнику, якщо опір його спіралі зменшити вдвічі, а силу струму вдвічі збільшити?
71. Дві лампи опороми 180 і 360 Ом під'єднали паралельно у коло напругою 120 В. Яку потужність буде мати кожна із ламп? Яка буде потужність, якщо лампи з'єднати послідовно?
72. Трамвайний двигун споживає силу струму 110 А при напрузі 600 В і розвиває силу тяги 3 кН. Визначте швидкість руху трамвая на горизонтальній ділянці, якщо ККД = 60 %.
73. Ліфт масою 1,5 т піднімається на висоту 20 м за 0,5 хв. Напруга на затискачах двигуна становить 220 В, а його ККД — 90%. Визначте силу струму в двигуні.
74. На скільки градусів нагріється алюмінієвий провідник із площею поперечного перерізу $4,5 \text{ мм}^2$ після пропускання по ньому струму силою 0,75 А протягом 20 с? Вважати, що від усієї енергії, що виділяється в провіднику під час проходження струму, навколишньому повітрю передається 0,5 частина енергії.
75. Ампер вважав, що електрика, зокрема електричний струм, позбавлені інертності. Чи мав рацію Ампер? Чому?
76. По срібному дроту, що має переріз 1 мм^2 , проходить струм силою 1 А. Обчисліть середню швидкість дрейфу вільних електронів у цьому дроті, припустивши, що кожен атом срібла дає один вільний електрон.
77. У 70-х роках ХХ ст. існували електронні обчислювальні машини, в яких імпульс струму від одного пристрою до іншого мав передаватися за 10 с. Чи можна було ці пристрої з'єднати дротиною завдовжки 40 см?
78. Значення ЕРС джерела струму часто визначають за показами вольтметра, під'єданого до затискачів джерела. Чи точно значення ЕРС дає цей найпростіший метод її оцінки? Що показує вольтметр, під'єднаний до затискачів джерела?
79. На батарейці кишенькового ліхтаря є напис: ЕРС 4,5 В, а на лампі вказано напругу 3,5 В. Чим пояснити таку різницю?
80. Батарейка для кишенькового ліхтарика замкнута на реостат. При опорі реостата 1,65 Ом напруга на ньому дорівнює 3,3 В, а при опорі 3,5 Ом — 3,5 В. Визначте ЕРС і внутрішній опір батарейки.
81. Визначте ЕРС і внутрішній опір гальванічного елемента, якщо при зовнішньому опорі 2 Ом сила струму в колі 0,6 А, а при опорі 1 Ом — 1 А.
82. Від генератора, що має ЕРС 40 В і внутрішній опір 0,04 Ом, струм надходить по мідному кабелю, переріз якого 170 мм^2 , до місця електрозварювання, віддаленого від генератора на 50 м. Визначте напругу на затискачах генератора і на зварювальному апараті, якщо сила струму в колі становить 200 А.
83. Яка напруга на полюсах джерела струму з ЕРС, що дорівнює 1 В, якщо опір зовнішньої частини електричного кола дорівнює внутрішньому опору джерела?

§ 8. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Провідниками електричного струму можуть бути різні речовини: метали, розчини електролітів і за певних умов газу та вакуум. Широкого застосування останнім часом набули речовини, які називають напівпровідниками. Для створення струму в якомусь середовищі потрібна наявність у ньому заряджених частинок, здатних переміщатися під дією електричного поля. Цими частинками можуть бути і електрони, і йони. З'ясувати природу струму — означає встановити, які саме заряджені частинки переносять заряд у даному середовищі.

Розглянемо металеві **провідники**. Носіями вільних зарядів у металах є електрони, концентрація яких велика — порядку 10^{28} у кубічному метрі. Ці електрони беруть участь у хаотичному тепловому русі. Під впливом же електричного поля вони починають переміщатися впорядковано із середньою швидкістю приблизно 0,5 мм/с. А швидкість поширення електричного поля всередині металевих провідників наближається до 300 000 км/с. Саме цю швидкість і пов'язують з поширенням електричного струму в металах. Провідність металів зумовлена рухом вільних електронів. Це експериментально довели Л. І. **Мандельштам** і М. Д. **Папалексі** в 1913 р., потім **Б. Стюарт** і **Р. Толмен** у 1916 р.

Під час руху в провіднику електрони провідності зазнають зіткнень з йонами кристалічної ґратки і при цьому втрачають частину енергії, набутої в електричному полі. Такі зіткнення і зумовлюють опір провідника. З підвищенням температури провідника зростає середня швидкість теплового руху електронів і збільшується амплітуда коливань йонів у вузлах ґратки. Це приводить до збільшення кількості зіткнень електронів з йонами. Таким чином, опір металів залежить від температури.

У 1911 р. голландський фізик **Г. Камерлінг-Оннес** відкрив надзвичайне явище — **надпровідність**. Він виявив, що під час охолодження ртуті в рідкому гелії її опір спочатку змінюється поступово, а потім, з досягненням температури 4,1 К, різко спадає до нуля. Явище зменшення опору до нуля при температурі, відмінній від абсолютного нуля, назвали надпровідністю. Згодом надпровідність було виявлено у багатьох інших металах. Метали, які мають властивість надпровідності, практично не нагріваються при проходженні через них струму, а це дає можливість передавати енергію без втрат.

Рідини, як і тверді тіла, можуть бути як діелектриками, так і провідниками. До діелектриків належить, наприклад, дистильована вода, до провідників — розчини електролітів: кислот, лугів і солей.

У курсі неорганічної хімії пояснюється, чому водні розчини електролітів проводять електричний струм. При розчиненні електролітів під впливом електричного поля полярних молекул води відбувається розпад молекул електролітів на йони. Цей процес називається **електролітичною дисоціацією**.

Ступінь дисоціації характеризується часткою молекул розчиненої речовини, що розпадаються на йони, і залежить від температури, концентрації розчину й діелектричної проникності розчинника. З підвищенням температури ступінь дисоціації зростає і, отже, збільшується концентрація позитивно і негативно заряджених йонів. Носіями заряду у водних розчинах і розплавах електролітів є позитивно і негативно заряджені йони.

Якщо посудину з розчином електроліту ввімкнути в електричне коло, то негативно заряджені йони почнуть рухатися до додатного електрода — анода, а позитивно заряджені — до від'ємного — катода. Внаслідок цього з'явиться електричний струм. **Оскільки заряди у водних розчинах і розплавах електролітів переносяться йонами, то таку провідність називають йонною.**

При йонній провідності проходження струму зв'язане з перенесенням речовини. На електродах виділяються речовини, що входять до складу електролітів. На аноді негативно заряджені йони віддають свої зайві електрони (у хімії це називається окиснювальною реакцією), а на катоді позитивно заряджені йони одержують електрони, яких не вистачає (відновна реакція).

Процес виділення на електродах речовин, пов'язаний з окиснювально-відновними реакціями, називають електролізом.

Електроліз широко застосовують з різною метою у техніці. За допомогою електролітичного способу покривають поверхні одного металу тонким шаром іншого (нікелювання, хромування, оміднення і т. д.). Це надійне покриття захищає поверхню металів від корозії.

Рідини можуть мати й електронну провідність, наприклад, рідкі метали.

Гази за нормальних умов (коли немає йонізатора) є ізоляторами і стають провідниками електричного струму тільки внаслідок зовнішньої дії. Електропровідність газу можна змінити, опромінюючи його ультрафіолетовими, рентгенівськими або радіоактивними променями, нагріваючи його тощо.

За нормальних умов гази на відміну від металів і електролітів не містять вільних носіїв струму, ні електронів, ні йонів, оскільки вони складаються з електрично нейтральних атомів і молекул. Внаслідок зовнішніх дій **газ йонізується, тобто від атомів і молекул відриваються електрони.** Йонізація, у свою чергу, спричиняє виникнення позитивних йонів і електронів. Якщо ж який-небудь нейтральний атом газу зможе приєднати до себе електрон, то виникне негативний йон. Отже, під час йонізації атома газу має бути виконана робота з йонізації, яка визначається силою взаємодії між електроном, що відривається, та йоном, що при цьому утворюється. Значення цієї роботи залежить від хімічної природи газу. Якщо атом втрачає два електрони, то вони стають двократно йонізованими і перетворюються у двовалентний йон.

Разом з процесом йонізації в газі відбувається **процес рекомбінації — перетворення йонів у нейтральні атоми або молекули.** Якщо зовнішній йонізатор припиняє дію, то провідність газу зменшується і він уже не може бути провідником. Якщо потужність йонізатора з часом не змінюється, то між процесами йонізації і рекомбінації встановлюється динамічна рівновага, за якої кількість пар заряджених частинок, що утворюються, дорівнює в середньому кількості пар йонів, які зникають внаслідок рекомбінації.

Процес проходження струму через газ називають газовим розрядом. **Струм у газі, який виникає під дією зовнішнього йонізатора, називається самостійним газовим розрядом.**

За певних умов у газах можливе збудження великої провідності внаслідок дії електричного поля. У цьому випадку ми маємо явище самостійного розряду і самостійну провідність.

Самостійним називають розряд у газах, який зберігається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.

Під час будь-якого самостійного розряду відбувається йонізація газу електронними ударами, однак наявність йонізації внаслідок електронного удару ще не веде до самостійного розряду. Дійсно, якщо усунути зовнішній йонізатор, то всі йони врешті-решт будуть нейтралізовані на електродах і розряд припиниться. Для самостійного розряду, треба, щоб і позитивні йони набували в електричному полі достатньої енергії для вибивання вільних електронів з молекул або з катода. Залежно від стану газу (температури і тиску), від напруги, форми й розмірів електродів самостійні газові розряди можуть відрізнятися один від одного як за зовнішнім виглядом, так і за характером фізичних процесів, які зумовлюють їх виникнення й проходження.

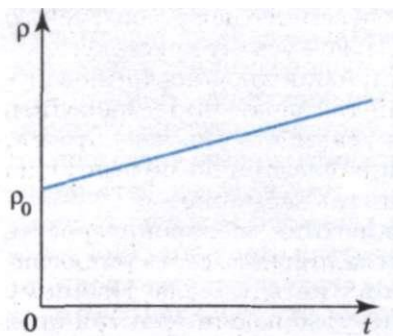
Серед самостійних розрядів виділяють такі: тліючий розряд, електрична дуга, коронний розряд та іскровий розряд.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

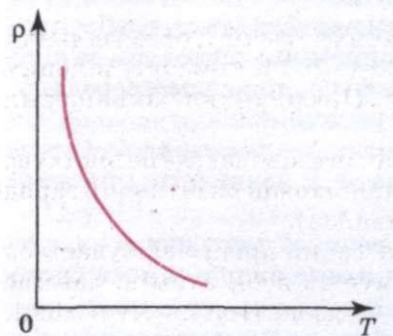
1. Які саме заряджені частинки переносять заряд у металах?
2. Чи проводить струм дистильована вода? Чому?
3. Яка природа струму в газах?

§ 9.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ



Мал. 31



Мал. 32

У 9 класі ви вивчали матеріал, який стосується напівпровідників і електричного струму в них. Тому ми коротко розглянемо те, про що ви знаєте, і більш детально зупинимося на інших властивостях напівпровідників та їх застосуванні.

Отже, відрізнити напівпровідники від провідників можна за характером залежності електропровідності від температури. Вимірювання під час дослідів показують, що в таких елементах, як Силіцій (Si), Германій (Ge), Селен (Se) тощо і їхніх сполуках (РЬБ, Сов та ін.) питомий опір з підвищенням температури не зростає, як у металів (мал. 31), а, навпаки, різко зменшується (мал. 32). Такі речовини і називають напівпровідниками.

З графіка, поданого на мал. 32, видно, що при температурах, які наближаються до абсолютного нуля, питомий опір напівпровідників дуже великий. Це означає, що при низьких температурах напівпровідник є фактично діелектриком. З підвищенням температури питомий опір швидко зменшується. *Учому ж причина цього явища?*

Щоб зрозуміти механізм виникнення провідності в напівпровідниках, треба розглянути будову напівпровідникових кристалів і природу зв'язків, що утримують атоми

кристала один біля одного. Як приклад розглянемо кристал силіцію.

Силіцій — чотиривалентний елемент. Це означає, що в зовнішній оболонці атома є чотири електрони, які порівняно слабо зв'язані з ядром. Кожний атом Силіцію має чотири найближчих сусідів. Схему структури кристала силіцію зображено на мал. 33.

Між парою сусідніх атомів існує так званий парноелектронний, або ковалентний, зв'язок. В утворенні цього зв'язку бере участь один валентний електрон від кожного атома, що відірвався від нього (колективізувався кристалом) і рухається у просторі між сусідніми атомами. Негативний заряд цих електронів утримує позитивні йони Силіцію один біля одного.

Не слід вважати, що колективізована пара електронів належить двом атомам. Кожний атом утворює чотири зв'язки із сусідніми, і будь-який валентний електрон може рухатися по одному з атомів. Дійшовши до сусіднього атома, він може перейти до наступного і так переміщатися уздовж усього кристала. Колективізовані валентні електрони належать усьому кристалу.

Парноелектронні зв'язки силіцію досить міцні й при низьких температурах не розриваються. Тому силіцій при низькій температурі не проводить електричний струм. Валентні електрони, що беруть участь у зв'язку атомів, міцно прив'язані до кристалічної ґратки, і зовнішнє електричне поле помітно не впливає на їх рух. Аналогічну будову має кристал германію.

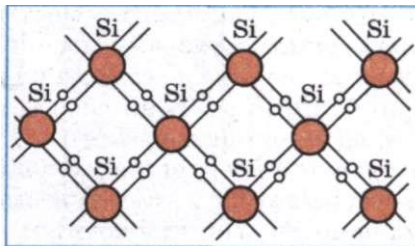
Від нагрівання силіцію кінетична енергія валентних електронів зростає і окремі зв'язки розриваються. Деякі електрони залишають свої «уторовані шляхи» і стають вільними, подібно до електронів у металі. В електричному полі вони переміщаються між вузлами ґратки, утворюючи електричний струм (мал. 34).

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають електронною провідністю.

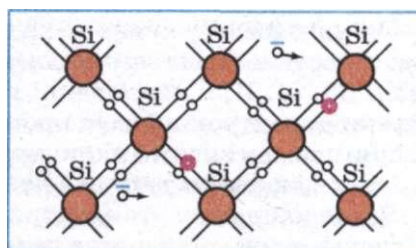
З підвищенням температури кількість розірваних зв'язків і, отже, вільних електронів збільшується. При нагріванні від 300 до 700 К кількість вільних носіїв заряду збільшується від 10^{17} до 10^{24} м⁻³. Це спричиняє зменшення опору.

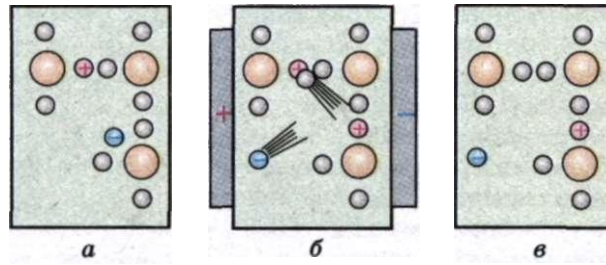
Якщо розривається зв'язок, то утворюється вакантне місце, де не вистачає електрона. Його називають діркою. У дірці є надлишковий позитивний заряд порівняно з іншими нормальними зв'язками (мал. 34).

Положення дірки в кристалі не є незмінним. Такий процес відбувається безперервно. Один з електронів, що забезпечує зв'язок атомів, займає місце дірки і відновлює тут парноелектронний зв'язок. При цьому в місці, звідки перескочив електрон, утворюється нова дірка. Отже, дірка може переміщатися в кристалі.



Мал. 33





Мал. 35

На мал. 35 зображено механізм електронної і діркової провідностей. За відсутності зовнішнього поля є один вільний електрон (-) і одна дірка (+) (мал. 35, а). При накладанні поля відбувається переміщення електронів. Вільний електрон прямує проти напрямку напруженості поля. У цьому ж напрямі переміщається також один із зв'язаних електронів (мал. 35, б). Це виглядає як перехід дірки в напрямі поля (мал. 35, в).

Якщо напруженість електричного поля в зразку дорівнює нулю, то переміщення дірок, рівноцінне переміщенню позитивних зарядів, відбувається хаотично і тому не створює електричний струм. При наявності електричного поля виникає упорядкований перехід дірок і, таким чином, до електричного струму вільних електронів додається електричний струм, обумовлений переходом дірок. Напрямок руху дірок протилежний напрямку руху електронів.

Отже, у напівпровідниках є носії зарядів двох типів: електрони й дірки.

Напівпровідники мають не тільки електронну, а й діркову провідність.

Ми розглянули механізм провідності ідеальних напівпровідників, що не мають ніяких домішок.

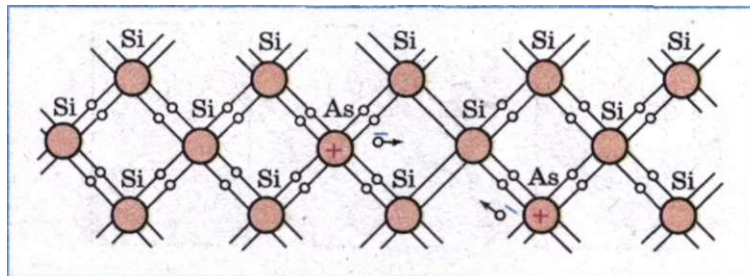
Провідність напівпровідників, які не мають домішок, називають власною провідністю напівпровідників.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які речовини відносять до напівпровідників?
2. Опишіть будову напівпровідників. Назвіть їх основні властивості.
3. Що називається електронною провідністю? Дірковою провідністю?
4. Опишіть механізм електронної і діркової провідності.

§ 10. ДОНОРНІ ТА АКЦЕПТОРНІ ДОМІШКИ. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ ЧЕРЕЗ p-n-ПЕРЕХІД

Власна провідність напівпровідників звичайно невелика, оскільки в них мало вільних електронів (наприклад, у германію при кімнатній температурі $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Водночас кількість атомів у 1 см^3 германію — порядку 10^{23} . Отже, кількість вільних електронів становить приблизно одну десяти-мільярдну частку загальної кількості атомів. Власна провідність напівпровідників багато в чому подібна до провідності водних розчинів і розплавів електролітів. У обох випадках кількість вільних носіїв заряду збільшується



Мал. 36

ся зі зростанням інтенсивності теплового руху. Тому і в напівпровідників, і у водних розчинів або розплавів електролітів провідність збільшується зі зростанням температури.

Істотна особливість напівпровідників полягає в тому, що в них при наявності домішок, крім власної провідності, виникає додаткова — домішкова провідність. Змінюючи концентрацію домішки, можна змінювати кількість носіїв заряду того чи іншого знака. Завдяки цьому створюються напівпровідники з переважною концентрацією — або негативно, або позитивно заряджених носіїв.

Виявляється, що коли є домішки, наприклад атомів Арсену, навіть якщо їх концентрація дуже мала, то кількість вільних електронів зростає в багато разів. Відбувається це з такої причини. Атоми Арсену мають п'ять валентних електронів. Чотири з них беруть участь у створенні хімічного (ковалентного) зв'язку даного атома з навколишніми атомами, наприклад з атомами Силіцію. П'ятий валентний електрон виявляється слабо зв'язаним з атомом. Він легко залишає атом Арсену і стає вільним (мал. 36).

При додаванні однієї десятимільйонної частки атомів Арсену концентрація вільних електронів дорівнюватиме 10^{16}см^{-3} . Це в тисячу разів більше за концентрацію вільних електронів у чистому напівпровіднику.

Домішки, які легко віддають електрони і, отже, збільшують кількість вільних електронів, називають донорними домішками.

Оскільки у напівпровідників з донорною домішкою багато електронів (порівняно з кількістю дірок), їх називають напівпровідниками «типу (з лат. *negativ* — негативний).

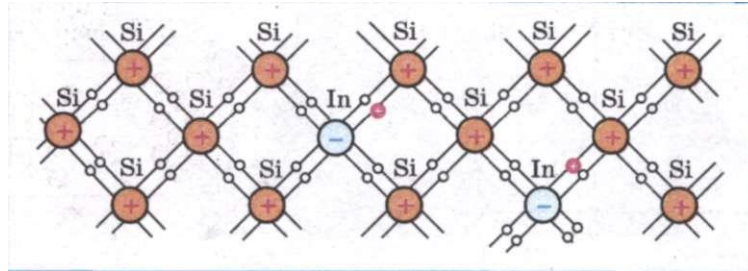
У напівпровіднику n-типу електрони — основні носії заряду, а дірки — неосновні.

Якщо як домішку використати індій, атоми якого тривалентні, то характер провідності напівпровідника зміниться. Тепер для встановлення нормальних парноелектронних зв'язків із сусідами атома Індію не вистачає електрона. Внаслідок цього утворюється дірка. Кількість дірок у кристалі дорівнюватиме кількості атомів домішки (мал. 37).

Такі домішки називають акцепторними.

Якщо існує електричне поле, то дірки переміщуються по полю і виникає діркова провідність.

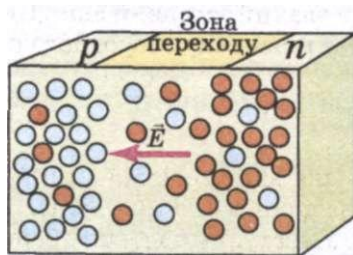
Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають напівпровідниками p-типу (з лат. *positiv* — позитивний).



Мал. 37

Дірки — основні носії заряду в напівпровіднику *p*-типу, а електрони — неосновні.

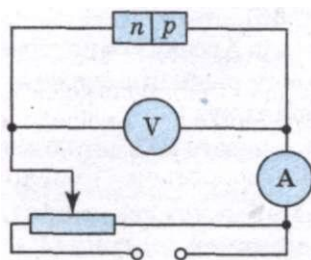
Будемо розглядати напівпровідник (мал. 38), права частина якого містить донорні домішки, в цьому випадку він є напівпровідником *n*-типу, а ліва — акцепторні, домішки, тоді він є напівпровідником *p*-типу.



Мал. 38

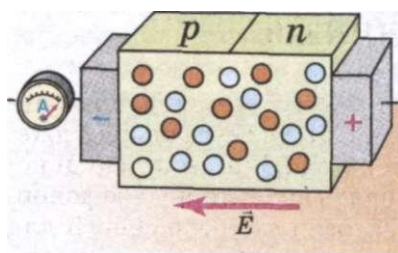
Контакт двох напівпровідників називають *p-n*-переходом.

При утворенні контакту електрони частково переходять з напівпровідника *n*-типу в провідник *p*-типу, а дірки — у зворотному напрямі. Відбувається процес дифузії, такий самий, як і під час зіткнення двох різних газів, молекули яких переміщуються внаслідок теплового руху. Таким чином, напівпровідник *n*-типу заряджається позитивно, а *p*-типу — негативно. Дифузія припиняється після того, як електричне поле, що виникає в зоні переходу, перешкоджає подальшому переміщенню електронів і дірок.



Мал. 39

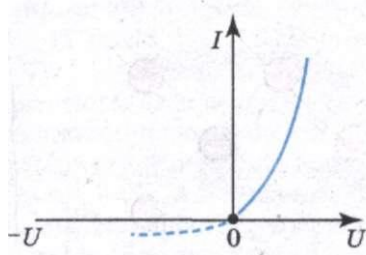
Увімкнемо напівпровідник з *p-n*-переходом в електричне коло (мал. 39). Спочатку приєднаємо батарею так, щоб потенціал напівпровідника *p*-типу був позитивним, а *n*-типу — негативним. При цьому струм через *p-n*-перехід передаватиметься основними носіями: з ділянки *n* у ділянку *p* електронами, а з ділянки *p* у ділянку *n* дірками (мал. 40). Внаслідок цього провідність усього зразка буде великою, а опір малим.



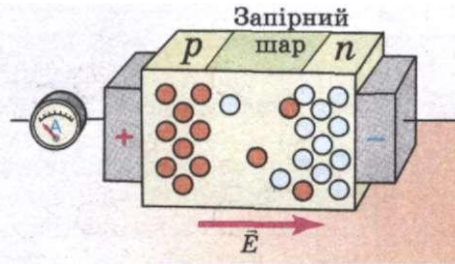
Мал. 40

Розглянутий перехід називають прямим. Залежність сили струму від різниці потенціалів — вольт-амперну характеристику прямого переходу — зображено на мал. 41 суцільною лінією.

Перемкнемо полюси батареї. В цьому разі при такій самій різниці потенціалів сила стру-



Мал. 41



Мал. 42

му в колі буде значно меншою, ніж при прямому переході. Це зумовлено тим, що електрони через контакт переходять з ділянки p у ділянку n , а дірки — з ділянки n у ділянку p . Проте у напівпровіднику r -типу мало вільних електронів, а в напівпровіднику p -типу мало дірок. Таким чином, через контакт переходять неосновні носії, а їх незначна кількість (мал. 42). Внаслідок цього провідність зразка буде малою, а опір великим. Утворюється так званий **запiрний шар**. Цей **перехід називають зворотним**. Вольт-амперну характеристику зворотного переходу зображено на мал. 41 штриховою лінією.

Отже, p — n -перехід щодо струму несиметричний: у прямому напрямі опір переходу значно менший, ніж у зворотному.

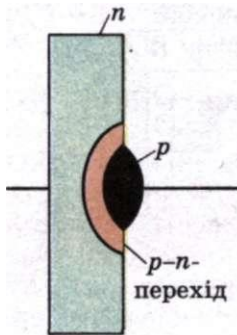
Цю властивість p — n -переходу використовують для випрямлення змінного струму. Протягом половини періоду, коли потенціал напівпровідника r -типу додатний, струм вільно проходить через p —«перехід. У наступну половину періоду струм практично дорівнює нулю.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

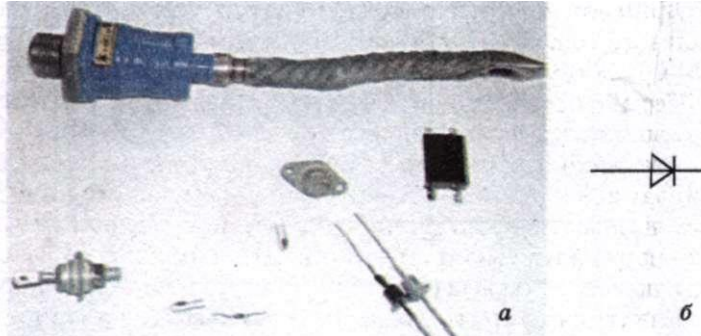
1. Які рухомі носії зарядів є в чистому напівпровіднику?
2. Що відбувається при зустрічі електрона з діркою?
3. Чому опір напівпровідника великою мірою залежить від наявності домішок?
4. Яку домішку — донорну чи акцепторну — треба ввести, щоб дістати напівпровідник p -типу?
5. Які носи заряду є основними, а які — неосновними в напівпровіднику з акцепторною домішкою?
6. Що таке r — p -перехід?

§ 11. НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД. ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Вам вже відомо, що в електронній лампі носії заряду — електрони — виникають внаслідок термоелектронної емісії. Це потребує спеціального джерела електричної енергії для розжарення нитки катода. У p — n -переході носії заряду утворюються тоді, коли у кристал вводять акцепторну або донорну домішку. Отже, відпадає потреба використовувати джерело енергії для одержання вільних носіїв заряду. У складних схемах зекономлена внаслідок цього енергія буває досить значною.



Мал. 43



Мал. 44

Напівпровідникові випрямлячі при таких самих значеннях випрямленого струму мініатюрніші, ніж електронні лампи, тому радіосхеми на напівпровідниках компактніші.

Зазначені переваги напівпровідникових приладів особливо істотні для використання їх на штучних супутниках Землі, космічних кораблях, в ЕОМ.

Напівпровідникові діоди виготовляють з германію, кремнію, селену та інших речовин.

Розглянемо утворення $p-n$ -переходу при використанні в діоді германію, що має провідність n -типу за рахунок невеликої добавки донорної домішки. Цей перехід не вдається одержати за допомогою механічного з'єднання двох напівпровідників з різними провідностями, оскільки при цьому буває надто великий зазор між напівпровідниками. Товщина $ж_p$ — n -переходу має бути не більшою від міжатомних відстаней. Тому в одну з поверхонь зразка вплавають індій. Внаслідок дифузії атомів Індію в монокристал германію біля поверхні германію утворюється ділянка з провідністю p -типу. Решта зразка германію, куди атоми Індію не проникли, як і раніше, має провідність n -типу. Між двома ділянками з провідністю різних типів і виникає $p-n$ -перехід (мал. 43). У напівпровідниковому діоді германій є катодом, а індій — анодом.

Щоб запобігти шкідливим впливам повітря і світла, кристал германію вміщують у герметичний металевий корпус (мал. 44, а). Схематичне зображення діода подано на мал. 44, б.

Напівпровідникові випрямлячі мають високу надійність і працюють тривалий час. Проте вони можуть працювати лише в обмеженому інтервалі температур (приблизно від -70 до 125°C).

З 9 класу ви знаєте, що у напівпровідниках електричний опір значною мірою залежить від температури. Цю властивість використовують для вимірювання температури за силою струму в колі з напівпровідником. Такі прилади називають термісторами або терморезисторами.

Термістори — одні з найпростіших напівпровідникових приладів. Для їх виготовлення використовують германій, селен та ін. Термістори випускають у вигляді стержнів, трубок, дисків, шайб і намистин розміром від кількох мікрометрів до кількох сантиметрів.

Діапазон вимірюваних температур більшості термісторів лежить в інтервалі від 170 до 570 К. Проте є термістори для вимірювання дуже високих (до 1300 К) і дуже низьких (від 4 до 80 К) температур.

Термістори застосовують для дистанційного вимірювання температури, протипожежної сигналізації тощо.

Електрична провідність напівпровідників підвищується не тільки від їх нагрівання, а й від їх освітлення. При освітленні напівпровідника сила струму в колі помітно зростає, що свідчить про збільшення провідності (зменшення опору) напівпровідників під дією світла. Цей ефект не пов'язаний з нагріванням, оскільки він може спостерігатися і при незмінній температурі.

Електрична провідність зростає внаслідок розривання зв'язків і утворення вільних електронів і дірок за рахунок енергії світла, що падає на напівпровідник. Це явище називають **фотоелектричним ефектом**. Прилади, в яких використовують фотоелектричний ефект у напівпровідниках, називають **фоторезисторами або фотоопорами**. Завдяки мініатюрності й високій чутливості фоторезистори використовуються в найрізноманітніших галузях техніки для реєстрації і вимірювання слабких світлових потоків. За допомогою фоторезисторів визначають якість поверхонь, контролюють розміри виробів тощо.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

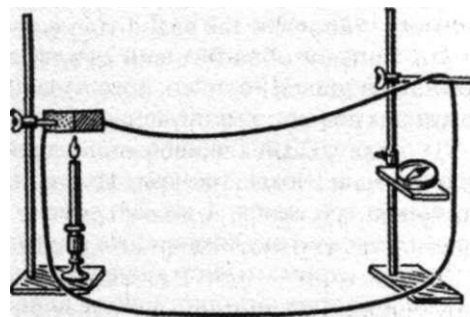
1. Що таке напівпровідниковий діод? Яка його будова?
2. Які види напівпровідників ви знаєте? Де вони застосовуються?

Це цікаво знати

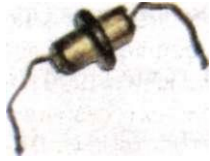
Першим кроком у дослідженні напівпровідників було відкриття у 1822 р. німецьким фізиком **Т. Зеебеком** явища виникнення ЕРС у колі з різних напівпровідників, місця з'єднання яких підтримувалися при різних температурах. Суть дослідів полягала у наступному: Зеебек, відтворюючи досліди Ерстеда, припаював два різних метали, з'єднував їх мідним провідником і розміщав усередині петлі, утвореної провідником, магнітну стрілку. Схема установки Зеебека наведена на мал. 45. Нагріваючи місце спаю за допомогою свічки, Зеебек помітив, що магнітна стрілка відхиляється! А через 12 років **Ж. Пельт'є** повідомив про температурні аномалії на контакті двох різнорідних провідників при проходженні через цей контакт електричного струму.

У 1821 р. учитель М. Фарадея **Г. Деві** встановив, що провідність «деяких металів» зменшується зі зростанням температури. Пізніше у 1833 р. вже сам Фарадей помітив, що при нагріванні сріблестого срібла його опір зменшується, тоді як відомо, що опір металів при нагріванні зростає (цю властивість використовують у **термісторах** — датчиках температури в електричних термометрах).

Фоточутливість напівпровідників вперше помітили в 1873 р. англійські електротехніки **В. Сміт** і **Дж. Мей**, які при



Мал. 45



Мал. 46

виготовленні високоомних опорів із селену спостерігали зменшення його опору при освітленні (цю властивість використовують у **фоторезисторах** — складових приладів для вимірювання світлових величин). Це явище відразу ж знайшло практичне використання: скориставшись високою фоточутливістю селену, американський винахідник **А. Белл** сконструював «фотофон» — прилад для передавання людської мови на відстань прямого зору, а вже на початку XX ст. за допомогою селенових фотоопорів було здійснено передачу зображень по проводах. У 1888 р. російський

фізик **В. Ульянін** у Казані опублікував повідомлення про відкриття ним явища виникнення фотоелектрорушійної сили при освітленні селену крізь напівпрозорий електрод. Знову про це явище повідомив у 1924 р. **Г. Гейгер**, а в 1932 р. **А. Ланге** побудував із закису міді перший фотоелемент із запірним шаром.

У 1922 р. інший російський фізик Нижегородської радіолабораторії **О. Лосєв** сконструював кристалічний детекторний приймач (кристадин), дію якого не могла пояснити жодна фізична лабораторія світу. Дослідження уніполярної (однобічної) провідності деяких речовин проводив німецький фізик Г. Ом, а перший напівпровідниковий (сульфідний) випрямляч для технічного застосування виготовив у 1906 р. у Росії **П. Павловський**.

Відкриття ж фізичних ефектів, покладених в основу **транзистора**, пов'язане саме з діяльністю видатного українського фізика **В. Лашкарьова** (1903—1974). Він по праву мав би одержати Нобелівську премію з фізики за відкриття транзисторного ефекту, якої в 1956 р. були удостоєні американські учені **Дж. Бардін, В. Шоклі, У. Браттейн**.

Ще в 1941 р. В. Лашкарьов опублікував статтю «Дослідження запірних шарів методом термозонда» і у співавторстві з К. Косоноговою — «Вплив домішок на вентильний фотоэффект в закису міді». Лашкарьов встановив, що обидві сторони «запільного шару», розташованого паралельно межі поділу мідь—закис міді, мають протилежні знаки носіїв струму. (На мал. 46 наведено купрокс-діод нар—л-переході (мідь—закис міді). Його виготовили на військовому заводі в Уфі під керівництвом Лашкарьова під час Другої світової війни і використовували у військових польових радіостанціях.)

Це явище одержало назву р—л-переходу. Вчений пояснив і механізм інжекції — важливого явища, на основі якого діють напівпровідникові діоди і транзистори.

Перше повідомлення в американському виданні про появу напівпровідникового підсилювача-транзистора з'явилося лише у липні 1948 р., тільки через 7 років після статті В. Лашкарьова. Його винахідники — американські учені Бардін і Браттейн пішли по шляху створення так званого точкового транзистора на базі кристала германію л-типу. Перший обнадійливий результат вони одержали наприкінці 1947 р. Проте прилад поводився нестійко, його характеристики відрізнялися непередбачуваністю, і тому практичного застосування точковий транзистор не дістав.

У 1951 р. у США з'явився надійніший — площинний — транзистор л—р—л-типу. Його створив Шоклі. Транзистор складався з трьох шарів германію л-, р- і л-типу, загальною товщиною 1 см, він зовсім не був схожий на подальші мініатюрні, а з часом і невидимі оку компоненти інтегральних схем.

До речі, отримати чисті монокристали германію та кремнію і на їх основі створити площинні транзистори та діоди вдалося іншому українському вченому **В. Тучкевичу**, який розробив також технологію виготовлення силових напівпровідникових вентилів (тиристорів).

Уже через декілька років значущість винаходу американських учених стала очевидною, і вони були нагороджені Нобелівською премією. Можливо, «холодна війна», що почалася тоді, відіграла свою роль у тому, що В. Лашкар'єв не став Нобелівським лауреатом. Його інтерес до напівпровідників не був випадковим. Починаючи з 1939 р. і до кінця життя учений послідовно і результативно займався дослідженнями їх фізичних властивостей. На додаток до двох перших праць Лашкар'єв у співавторстві із **В. Ляшенком** опублікував статтю «Електронні стани на поверхні напівпровідника», в якій було описано результати досліджень поверхневих явищ в напівпровідниках, що стали основою роботи інтегральних схем на базі польових транзисторів.

Під керівництвом В. Лашкар'єва на початку 50-х років ХХ ст. в Інституті фізики АН УРСР було організовано виробництво точкових транзисторів. Сформована ним наукова школа у галузі фізики напівпровідників стала однією з провідних у колишньому СРСР. Визнанням видатних результатів стало створення в 1960 р. Інституту напівпровідників АН УРСР, який очолив В. Лашкар'єв. У 2002 р. ім'я В. Лашкар'єва присвоєно заснованому ним Інституту напівпровідників НАН України.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДІОДОМ

Мета роботи: дослідити, як проводить постійний струм напівпровідниковий діод.

Прилади і матеріали: напівпровідниковий діод типу Д7, Д226 або інший; гальванічний елемент, батарея гальванічних елементів чи інше джерело постійного струму напругою до 4,5 В; лампочка розжарення напругою 2,5–3,5 В на підставці; вимикач, з'єднувальні проводи.

Хід роботи

1. Розгляньте напівпровідниковий діод (мал. 47). Ознайомтеся з написами та умовними позначеннями на його корпусі, звернувши особливу увагу на напрям стрілочки.

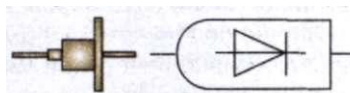
2. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на мал. 48.

3. Зверніть увагу на світіння лампочки під час замикання кола. Не розмикаючи коло, закоротіть діод провідником, як показано на схемі штриховою лінією. Що ви будете спостерігати?

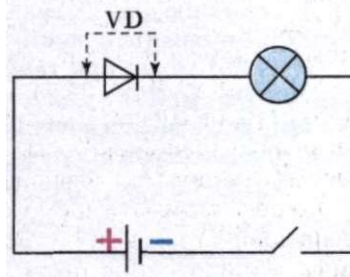
4. Вимкніть вимикач і перемкніть діод, повернувши його на 180°. Замкніть коло. Що ви спостерігаєте зараз?

5. Замкніть діод провідником. Що змінилося порівняно з попереднім дослідом?

6. Зробіть висновок про те, як напівпровідниковий діод проводить постійний струм, як пов'язані між собою полярність вмикання джерела струму, напрям стрілочки на діоді та світіння лампочки.



Мал. 47



Мал. 48

Ті, хто глибше цікавиться фізикою, можуть дослідити залежність сили струму діода від температури й освітленості. Для цього ще треба мати фотодіод та мікроамперметр чи міліамперметр (до 5 мА).

Контрольні запитання

1. Чому в техніці так важливі напівпровідникові діоди?
2. Що відбувається, коли ми перемикаємо діод, повернувши його на 180° ?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Чи втрачає свою теплову енергію під час зіткнення з йонами ґратки електрон провідності металу?

Розв'язання

Ні. Він втрачає тільки незначну кінетичну енергію, якої він набув при напрямленому русі в електричному полі.

2. Дистильована вода навіть після подвійної перегонки трохи проводить струм. Як це пояснити?

Розв'язання

Дуже мала частина молекул води дисоційована, і утворені йони H^+ та OH^- спричиняють невелику провідність води.

3. Яка провідність напівпровідникового матеріалу — вища, власна чи домішкова?

Розв'язання

Домішкова (за тих невисоких температур, під час яких використовують більшість напівпровідникових пристроїв та елементів схем).

Рівень А

84. Як вплине на середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному провіднику збільшення сили струму в ньому в k разів?
85. Чи однакова потужність електроплитки у таких випадках: а) на ній стоїть посудина з холодною водою; б) посудини немає?
86. Чи витрачається енергія електричного струму на електролітичну дисоціацію?
87. Який йон має найбільшу рухомість у розчині електроліту?
88. Чи виконується закон Джоуля—Ленца під час проходження струму через розчин електроліту?
89. Чи можна користуватися законом Ома для обчислення значень сили струму в розчині електролітів?
90. До германію додали невелику кількість атомів Арсену. Що і чому є основними носіями зарядів у такому напівпровіднику?
91. Магній і телур при температурі 20°C мають питомі опори відповідно $0,04$ і $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Яка з цих двох речовин є напівпровідником?
92. Чому полярне сійво можна спостерігати тільки у верхніх шарах земної атмосфери?
93. У діоді електрон підлітає до анода зі швидкістю 8 Мм/с . Визначте анодну напругу ($v_{0e} = 0$).

Рівень В

94. З міді виготовили різного перерізу, але однакової довжини й маси, провідники. Порівняйте їх опори.

95. Амперметр вимірює силу струму в електроплитці з відкритою спіраллю. Чи зміняться його покази, якщо сильно подути зверху: а) на амперметр; б) на електроплитку?
96. Чи може надпровідник проводити струми як завгодно великої сили?
97. До посудини з електролітом прикладено сталу напругу. Чи залежить сила струму в ній від температури?
98. Чи є обмеження на напругу, яку ми повинні прикласти до посудини з підкисленою водою, щоб розкласти воду на водень і кисень?
99. З якою метою металеві труби водовідводів приєднують до від'ємного полюса джерела струму?
100. Пояснити явище ударної йонізації в газах.
101. Якщо заряджену скляну паличку потримати над запаленою спиртівкою, то вона швидко втратить свій заряд. Чому?
102. До кінців кола, що складається з послідовно ввімкнених термістора та резистора опором 750 Ом , подали напругу 20 В . При кімнатній температурі сила струму в колі була 10 мА . Коли термістор занурили в гарячу воду, сила струму стала 20 мА . У скільки разів змінився опір термістора?
103. Який питомий опір повинна мати домішка алюмінію в кремнії (за масою, у відсотках), щоб концентрація дірок у ньому становила 5 см^{-3} ? Припустити, що в утворенні дірки бере участь кожен атом Алюмінію.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Чи можуть силові лінії електричного поля: а) дотикатись; б) перетинатись; в) бути замкненими?
2. Чи однаково швидко зменшується напруженість поля з віддаленням від: а) точкового заряду; б) системи з двох таких самих різноіменних зарядів, розміщених поряд?
3. Як залежить від вибору точки відліку: а) потенціал певної точки поля; б) різниця потенціалів двох точок?
4. Як точковий заряд діє на мильні бульбашки в повітрі і на повітряні бульбашки у воді?
5. Чи зміниться ємність плоского конденсатора, якщо одна з його пластин паралельно зміститься?
6. Одна з пластин плоского конденсатора більша за другу. Яка з цих пластин набуде більшого заряду під час заряджання?
7. Які параметри впливають на максимальну робочу напругу конденсатора?
8. Яке з'єднання конденсаторів — послідовне чи паралельне — більше «боїться» пробою?
9. Чи можна підняти однією рукою сучасний конденсатор ємністю кілька фарад?
10. У чому неточність твердження: в замкненому електричному колі гальванічного елемента струм проходить у напрямі до нижчого потенціалу?
11. Щоб збільшити силу струму в колі у два рази, учень увімкнув послідовно замість одного два елементи з однаковою ЕРС. Чи досяг він мети?
12. Два провідники різних опорів вмикають у коло одного і того самого джерела постійного струму: одного разу послідовно, другого — паралельно. Чи однакові ККД джерела будуть в обох випадках, якщо внутрішній опір джерела дуже малий і ним можна знехтувати?

13. Метали мають велику електропровідність. Разом з тим у них велика теплопровідність. Поясніть цю закономірність.

14. 100 % -на сірчана кислота — рідина неелектропровідна. Проте розчин її у воді є добрим провідником струму. З'ясуйте причину цього.

15. Що — електрони чи йони — більш ефективні в процесі утворення лавин заряджених частинок під час ударної йонізації, що супроводить електричний розряд у газах? Чому?

16. Де сильніше зв'язані з ядрами атомів електрони: в металах чи напівпровідниках? Поясніть чому.

17. Чи будуть змінюватися під дією електричного поля імпульс і кінетична енергія дірок, як і електронів? Чому?



Що я знаю і вмю робити

Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

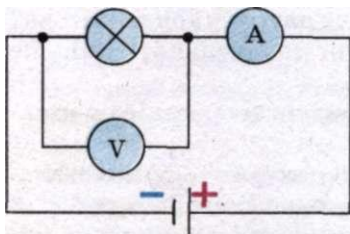
1. Яка вода — холодна чи кипляча — краще проводить струм?
2. Чи змінюється провідність розчинів електролітів від зниження їх температури?
3. Чи можна застосовувати електричну дугу для зварювання металів під водою?
4. Чи можна виготовити напівпровідниковий діод таким малим, щоб його не можна було побачити неозброєним оком?

Я знаю, як застосувати закони фізики

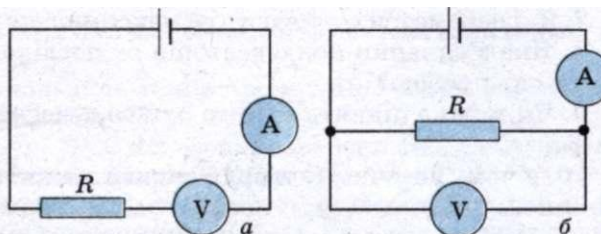
5. Чи виконуватиметься закон Ома для ділянки кола, опір якої пропорційний прикладеній напрузі?
6. За яких умов для сили струму, що проходить між двома електродами, розділеними газом, справджується закон Ома?
7. Який із видів самостійного розряду в газі можна описати законом Ома для зв'язку напруги і сили струму?

Я вмю використовувати схеми електричних кіл

8. Вольтметр показує напругу 12 В, амперметр — силу струму 1,2 А. Яку потужність споживає лампочка (мал. 49)?
9. Як правильно виміряти значення невідомого опору, маючи вольтметр, амперметр і джерело ЕРС з відомим внутрішнім опором (мал. 50, а, б)?



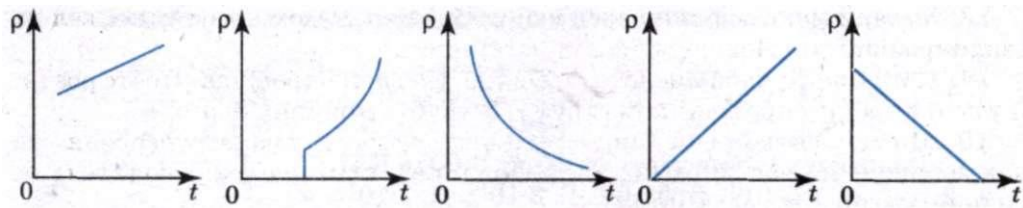
Мал. 49



Мал. 50

Я вмю читати графіки

10. На якому графіку зображено залежність питомого опору металевого провідника від температури при дуже низьких температурах?



Я знаю, як потрібно розв'язувати задачі

11. Конденсатор ємністю 6 мкФ , заряджений до напруги 400 В , з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 19 мкФ . Якою стала напруга на конденсаторах?

12. Заряд плоского конденсатора дорівнює $17,7 \text{ нКл}$, площа обкладок — 10 см^2 , відстань між ними — $3,5 \text{ мм}$. Конденсатор заповнено слюдою. Визначте енергію електричного поля в конденсаторі.

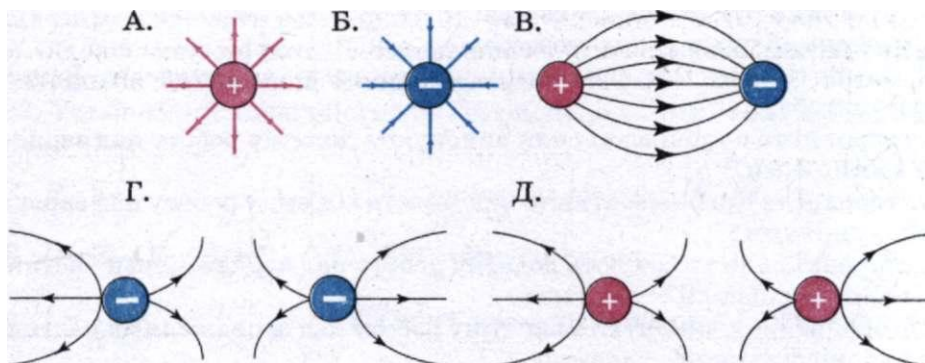
13. Батарея з двох послідовно з'єднаних елементів з ЕРС 2 В і внутрішнім опором $0,5 \text{ Ом}$ кожний замкнута на резистор опором 3 Ом . Визначте потужність струму в резисторі.

14. Якої площі поперечного перерізу треба взяти нікеліновий дріт завдовжки 20 м , щоб виготовити з нього нагрівник на 220 В , за допомогою якого можна нагріти 2 л води від $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до кипіння за 10 хв при ККД 80% ?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант I

- Основною ознакою електричного поля є силова дія на
 - заряджені частинки.
 - молекули ідеального газу.
 - магнітні полюси постійних магнітів.
 - нейтрони.
 - атоми хімічних елементів.
- На якому малюнку електричне поле точкових зарядів зображено неправильно?



- Як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо відстань між ними збільшити втричі?
 - Збільшиться у 3 рази.
 - Збільшиться у 6 разів.
 - Зменшиться у 3 рази.
 - Зменшиться у 6 разів.
 - Зменшиться у 9 разів.

4. За якою формулою визначають енергію електричного поля зарядженого конденсатора?

А. $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$. Б. $W = \frac{CU^2}{2}$. В. $E = \frac{U}{\Delta d}$. Г. $F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$. Д. $E = \frac{F}{q}$.

5. Скільки електронів утворює заряд $0,00 \times 6$ Кл?

А. $2 \cdot 10^{18}$. Б. $1,5 \cdot 10^{19}$. В. $5 \cdot 10^{18}$. Г. $3 \cdot 10^{19}$. Д. $1 \cdot 10^{16}$.

6. На відстані 5 см дві частинки, що мають однакові за значенням заряди, притягуються в повітрі одна до одної з силою 20 мН. Визначте заряди частинок.

А. +74 нКл. Б. -74 нКл. В. ± 74 нКл. Г. ± 74 мКл. Д. +74 мкКл.

7. Визначте різницю потенціалів між двома точками електростатичного поля, якщо під час переміщення між ними заряду 4 мкКл сили поля виконали роботу 1 мДж.

А. 0,004 В. Б. 250 В. В. 25 В. Г. 4 кВ. Д. 2,5 В.

8. Який заряд накопичено в конденсаторі ємністю 2000 мкФ, зарядженому до напруги 20 В?

А. 100 Кл. Б. 0,4 Кл. В. 0,01 Кл. Г. 40 мКл. Д. 4 Кл.

9. Визначте енергію електричного поля конденсатора ємністю 2000 мкФ, приєднаного до полюсів джерела струму напругою 100 В.

А. 0,01 Дж. Б. 0,1 Дж. В. 1 Дж. Г. 10 Дж. Д. 100 Дж.

10. Установіть відповідність між назвами одиниць фізичних величин і позначеннями фізичних величин:

А. U .	1. Фарад.
Б. q .	2. Вольт.
В. E .	3. Кулон.
Г. C .	4. Ньютон на Кулон.

11. Електричний струм — це

А. упорядкований рух заряджених частинок.

Б. хаотичний рух заряджених частинок.

В. упорядкований рух атомів і молекул.

Г. хаотичний рух атомів і молекул.

Д. хаотичний рух вільних електронів.

12. Лампочка електричного ліхтарика працює від акумулятора. Всередині акумулятора

А. сторонні та кулонівські сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками.

Б. сторонні та кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками.

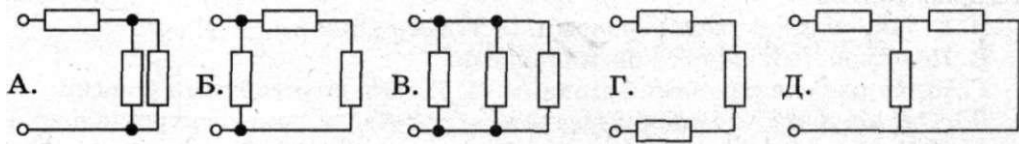
В. сторонні сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — від'ємну.

Г. сторонні сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — додатну.

Д. тільки кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими

мі $A. I = \frac{q}{t}$. Б. $I = \frac{U}{R}$. В. $I = \frac{P}{U}$. Г. $I = envS$. Д. $I = \frac{\epsilon}{R+r}$ — сили струму?

14. На якому з малюнків показано послідовне з'єднання трьох провідників?



15. Через резистор опором 1 кОм проходить струм силою 10 мА. Яку напругу прикладено до резистора?

А. 10 В. Б. 100 мВ. В. 100 В. Г. 10^{-5} В. Д. 10^5 В.

16. Два резистори з опором 20 і 50 Ом з'єднали паралельно і увімкнули в мережу. Визначте відношення сил струмів у резисторах.

А. 0,8. Б. 0,5. В. 1. Г. 2. Д. 2,5.

17. Яка сила струму в електричній лампочці, якщо через її спіраль за 5 хв проходить заряд 135 Кл?

А. 4,5 А. Б. 0,45 А. В. 9 А. Г. 0,9 А. Д. 100 А.

18. Три провідники з однаковими опором по 10 Ом з'єднали так, як показано на схемі. Який загальний опір з'єднання?

А. 15 Ом. Б. 10 Ом. В. 30 Ом. Г. 50 м. Д. 20 Ом.

19. Яке значення зовнішнього опору, якщо генератор з ЕРС 230 В і внутрішнім опором 0,1 Ом подає в зовнішню частину кола напругу 220 В?

А. 2,2 Ом. Б. 3,3 Ом. В. 22 Ом. Г. 33 Ом. Д. 0,2 Ом.

20. В обмотці електричного двигуна, опір якої 0,75 Ом, сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

А. 15 Дж. Б. 300 Дж. В. 18 кДж. Г. 18 Дж. Д. 30 кДж.

21. Під час ремонту електроплитки її спіраль вкоротили вдвічі. Як змінилась потужність плитки, якщо напруга в мережі стала? Температуру розжарення спіралі вважати незмінною.

А. Збільшилась у 4 рази. Б. Зменшилась у 4 рази. В. Збільшилась у 2 рази. Г. Зменшилась у 2 рази. Д. Не змінилась.

22. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А. $R = \rho \frac{l}{S}$.

Б. $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

В. $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$.

Г. $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{вт}}}{q}$.

1. Закон Ома для повного кола.

2. ЕРС джерела струму.

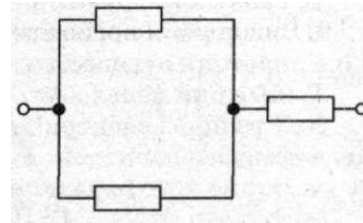
3. Опір n послідовно з'єднаних провідників.

4. Опір провідника.

23. Електричний струм в електролітах створюють

А. вільні електрони. Б. дірки і вільні електрони.

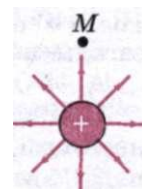
В. позитивні й негативні йони. Г. дірки. Д. протони.



24. Якими носіями електричних зарядів створюється струм у чистих напівпровідниках?
 А. Тільки вільними електронами. Б. Тільки дірками.
 В. Позитивними і негативними йонами.
 Г. Вільними електронами і дірками. Д. Тільки позитивними йонами.
25. Сила струму в лампочці ліхтарика 0,32 А. Скільки електронів проходить через поперечний переріз нитки розжарення за 10 с?
 А. $2 \cdot 10^{16}$. Б. $2 \cdot 10^{19}$. В. $2 \cdot 10^{22}$. Г. $2 \cdot 10^{11}$. Д. $2 \cdot 10^9$.
26. Чи отримаємо р-я-перехід, якщо впаяти олово у германій або у ванадій?
 А. Так (в обох випадках). Б. Ні — для ванадію і так — для германію.
 В. Ні (в обох випадках). Г. Ні — для германію і так — для ванадію.

В а р і а н т II

1. При натиранні скляної пластинки шовком пластинка отримує позитивний заряд. При цьому
 А. електрони переходять зі скла на шовк.
 Б. електрони переходять із шовку на скло.
 В. позитрони переходять із шовку на скло.
 Г. протони переходять зі скла на шовк.
 Д. протони переходять із шовку на скло.
2. У точці M електричного поля позитивного точкового заряду перебуває електрон. У якому напрямі почне рухатись електрон, якщо його початкова швидкість дорівнює нулю?
 А. Від заряду. Б. Перебуватиме в стані спокою.
 В. До заряду. Г. Навколо заряду. Д. По спіралі від заряду.
3. Як зміниться електроємність плоского повітряного конденсатора, якщо відстань між його обкладками (пластинами) збільшити у 2 рази?
 А. Збільшиться у 2 рази. Б. Збільшиться у 4 рази.
 В. Зменшиться у 2 рази. Г. Зменшиться у 4 рази. Д. Не зміниться.
4. За якою формулою визначають напруженість електричного поля?
 А. $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$. Б. $W = \frac{CU^2}{2}$. В. $E = \frac{U}{\Delta d}$. Г. $F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$. Д. $E = \frac{F}{a}$.
5. Визначте силу кулонівської взаємодії двох електронів, що знаходяться на відстані 1 м.
 А. $23 \cdot 10^{-28}$ Кл. Б. $2,3 \cdot 10^{-27}$ Кл. В. $2,3 \cdot 10^{-29}$ Кл. Г. $2,3 \cdot 10^{-28}$ Кл. Д. $2,3 \cdot 10^{-20}$ Кл.
6. Яка сила діє на точковий заряд 100 мкКл, розміщений в однорідному електричному полі з напруженістю 10 кВ/м?
 А. 1 Н. Б. 100 Н. В. 10 кН. Г. 10 Н. Д. 0,1 Н.
7. Кулька, що має заряд $+2 \cdot 10^{-6}$ Кл, у гасі притягує до себе заряджену пилінку із силою 4 мН. Визначте заряд пилінки, якщо відстань між кулькою і нею 2 см.
 А. 0,19 нКл. Б. 1,9 нКл. В. -0,19 нКл. Г. -1,9 нКл. Д. -0,19 мКл.
8. Чому дорівнює емність плоского повітряного конденсатора із площею пластин $11,3 \text{ см}^2$, які розташовані на відстані 1 мм одна від одної?
 А. 8,85 мкФ. Б. 10 пФ. В. 100 пФ. Г. 11,3 мкФ. Д. 5,6 мкФ.
9. Яка електроємність батареї, що складається з двох паралельно з'єднаних однакових конденсаторів емністю по 10 мкФ?
 А. 10 мкФ. Б. 5 мкФ. В. 20 мкФ. Г. 15 мкФ. Д. 25 мкФ.



10. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А. $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon R^2}$.

1. Напруженість електричного поля.

Б. $E = \frac{U}{\Delta d}$.

2. Ємність плоского конденсатора.

В. $W = \frac{CU^2}{2}$.

3. Закон Кулона.

Г. $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$.

4. Енергія електричного поля.

11. Вкажіть неправильне твердження:

А. Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику внаслідок проходження в ньому струму, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму.

Б. При послідовному з'єднанні провідників їхній загальний опір дорівнює сумі опорів цих провідників.

В. При послідовному з'єднанні провідників кількість теплоти, що в них виділяється, обернено пропорційна до опорів цих провідників.

Г. Загальний опір кількох паралельно з'єднаних провідників менший за опір будь-якого з цих провідників.

Д. При паралельному з'єднанні провідників напруга на кожному з них однакова.

12. Якими носіями електричних зарядів створюється струм у металах?

А. Вільними електронами і позитивними йонами.

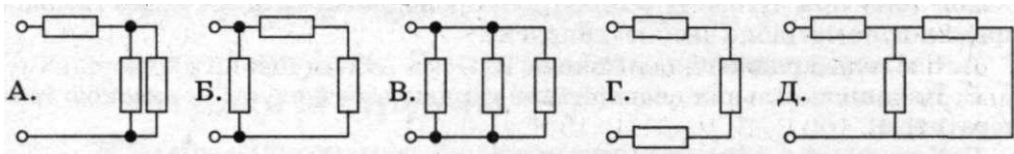
Б. Позитивними і негативними йонами. В. Вільними електронами.

Г. Негативними йонами. Д. Позитивними йонами.

13. Яке з математичних співвідношень відповідає закону Ома для повного кола?

А. $I = \frac{q}{t}$. Б. $I = \frac{U}{R}$. В. $I = \frac{P}{U}$. Г. $I = envS$. Д. $I = \frac{\epsilon}{R+r}$.

14. На якому з малюнків показано паралельне з'єднання трьох провідників?



15. Три резистори з опорами 100 Ом з'єднані послідовно. Чому дорівнює їх загальний опір?

А. 66,67 Ом. Б. 33,33 Ом. В. 100 Ом. Г. 0,33 Ом. Д. 300 Ом.

16. Два резистори з опорами 20 і 50 Ом з'єднали паралельно і увімкнули в мережу. Визначте відношення сил струмів у резисторах.

А. 0,8. Б. 0,5. В. 1. Г. 2. Д. 2,5.

17. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначте внутрішній опір джерела.

- А. 0,1 Ом. Б. 1 Ом. В. 10 Ом. Г. 100 Ом. Д. 0,01 Ом.
18. Провідником з опором 1,5 Ом протягом 4 с проходить заряд 12 Кл. Яку роботу виконує електричний струм, що проходить провідником?
- А. 20 Дж. Б. 5,4 Дж. В. 2 Дж. Г. 54 Дж. Д. 3кДж.
19. У школі одночасно світиться 40 ламп по 60 Вт, 20 ламп по 100 Вт і 11 ламп по 40 Вт. Визначте силу струму в спільній частині кола для напруги 220 В.
- А. 2 А. Б. 5,6 А. В. 10 А. Г. 56 А. Д. 22 А.
20. Як зміниться кількість теплоти, яка виділяється в електрочайнику, якщо опір його спіралі зменшити вдвічі, а силу струму вдвічі збільшити?
- А. Збільшиться у 4 рази. Б. Зменшиться у 2 рази.
В. Збільшиться у 2 рази. Г. Зменшиться у 4 рази. Д. Не зміниться.
21. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами:
- | | |
|-----------------------|--------|
| А. Сила струму. | 1. Ом. |
| Б. ЕРС. | 2. А. |
| В. Опір. | 3. Кл. |
| Г. Електричний заряд. | 4. В. |
22. Електричний струм у напівпровідниках створюють:
- А. Вільні електрони. Б. Дірки і вільні електрони. В. Позитивні і негативні йони. Г. Дірки. Д. Протони.
23. Що таке електролітична дисоціація?
- А. Процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони під впливом електричного поля полярних молекул води.
Б. Процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони внаслідок проходження струму через електроліт.
В. Розпад молекул розчиненої речовини під впливом електричного поля, яке створює джерело струму.
Г. Явище руху позитивних і негативних йонів електроліту у протилежні боки під впливом електричного поля.
Д. Процес проходження струму в електроліті.
24. Через поперечний переріз нитки розжарення електролампочки пройшло $1\text{Д}\cdot 10^{21}$ електронів за 15 хв. Який заряд пройшов через лампочку за цей час?
- А. 180 Кл. Б. 3 Кл. В. 0,5 Кл. Г. 2000 Кл. Д. 0,018 Кл.
25. Чому при дуговому розряді для проходження струму через газовий проміжок не потрібно високої напруги?
- А. Є вільні заряджені частинки.
Б. Наявність вільних електричних зарядів забезпечується високою температурою.
В. Електроди йонізують навколо себе газ.
Г. Наявність носіїв заряду забезпечується електронною емісією.
26. Чому для зменшення втрат електроенергії на коронний розряд у лініях електропередачі високої напруги застосовують дроти якомога більшого діаметру?
- А. Щоб збільшити інтенсивність йонізації.
Б. Щоб збільшити напруженість поля.
В. Щоб зменшити інтенсивність йонізації і збільшити напруженість поля.
Г. Щоб зменшити інтенсивність йонізації і напруженість поля.