

ВАЛЕРІЙ СТАРОЩУК

ПРО ЯВИЩЕ НАДПРОВІДНОСТІ

ТРОХИ ТЕОРІЇ

Мал. 1.

ЧУДЕСА ТЕХНІКИ

Уже перші досліди з електрики продемонстрували, що срібло, мідь і алюміній добре проводять електричний струм, а фарфор, скло, гума і шовк – погано. Тому з перших матеріалів люди виготовляють провідники, а другі використовують для ізоляції проводів і захисту від ураження електричним струмом. На мал. 1 ви бачите сучасний мережевий двожильний провідник. Кожна жила складається з семи мідних провідників у пластиковій ізоляції. Враховуючи те, що провідник працює під небезпечною для людини напругою у 220 В, дві ізольовані жили додатково вкриті спільним шаром пластикової ізоляції.

Провідник, по якому протікає електричний струм, нагрівається. Цю властивість використовують у нагрівальних прасках, електробатарей, лампах розжарення. На мал. 2 зображена вольфрамова спіраль, яка розжарилась під дією струму і випромінює світло.

Сьогодні все частіше використовують енергозберігаючі люмінесцентні лампи, але й у них є маленька нитка розжарення для випромінювання електронів.

Провідник, по якому тече електричний струм, не лише нагрівається, але й створює навколо себе магнітне поле. Цю властивість вперше помітив і описав 1820 року данський учений Ганс Христіан Ерстед. На мал. 3 ви бачите, як під впливом магнітного поля залізни ошурки вишикувалися навколо мідного провідника зі струмом. Магнітне поле струму використовують у роботі електродвигунів, генераторів, електромагнітів.

Отже, під час проходження електричного струму по провіднику енергія джерела струму перетворюється і в теплову, і в енергію магнітного поля. Під час таких перетворень відбуваються небажані втрати енергії. Наприклад, навіщо нам нагрівання і магнітне поле навколо провідника, який з'єднує праску і розетку? Те саме стосується провідників, які передають електричний струм від електростанції до наших будинків. Щоб уникнути зайвих втрат енергії, опір провідників намагаються зменшити.

Електричний опір зразка залежить від матеріалу, з якого він виготовлений, температури і геометричних розмірів. Тому зручно характеризувати матеріал циліндричного провідника питомим опором, тобто опором зразка довжиною 1 м, площею поперечного перерізу 1 мм² за температури 20 °С. Наприклад, питомий опір міді становить $r = 0,0125 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Це означає, що мідний (Cu) провідник завдовжки 1 м та площею поперечного перерізу 1 мм² чинить опір електричному струмові 0,0125 Ом. Саме від опору залежить, який струм протікає по провіднику за даної напруги. Наприклад, якщо напруга на кінцях провідника становить 0,1 В, то через нього пройде струм

$$I = U/R = 0,1/0,0125 = 8 \text{ А}$$

Для наочності уявімо собі електрони у вигляді маленьких синіх чоловічків (мал. 4).

Якщо струм у згаданому провіднику 8 А, то за одну секунду у нього забіжить $5 \cdot 10^{19}$ (50 мільярд мільярдів!) таких чоловічків. Це майже у 70 мільярдів разів більше, ніж людей на планеті. Зверніть увагу на те, що стільки ж чоловічків щосекунди вибігає

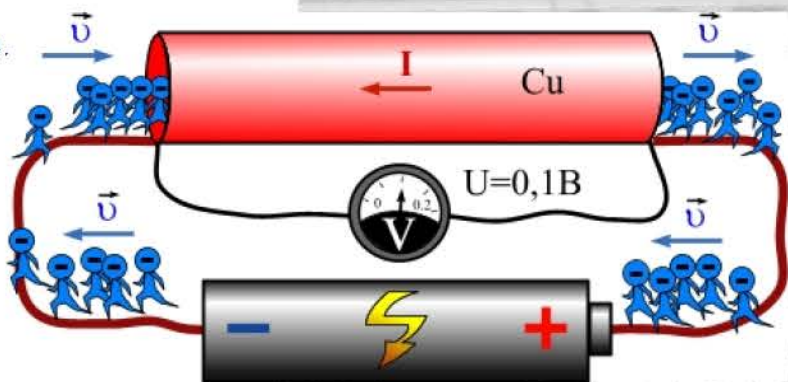
з провідника. За напрямком струму у провіднику домовилися прийняти напрямок позитивно заряджених частинок. Але у металах носіями струму є негативно заряджені електрони, тому на малюнку напрямок струму вказаний протилежно до напрямку швидкості електронів.

Мал. 3.

Мал. 2.



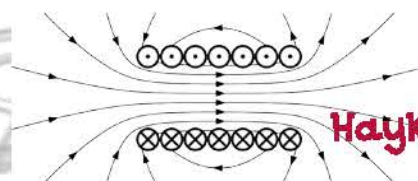
Мал. 4.



У провіднику знаходяться позитивні йони міді, з якими наші електрон-чоловічки стикаються, граються, хапають їх руками. Адже між негативно зарядженими електронами і позитивно зарядженими йонами існують сили притягання. Захопити йон із собою електрону-чоловічку не вдається, бо йони набагато важчі, ніж електрони, і міцно зв'язані між собою силами у кристалічній решітці. А от розхитати йони нашим чоловічкам до снаги. При цьому електрони втрачають свою швидкість, а, отже, енергію руху, а провідник – нагрівається.

ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ

Голландський учений Хейке Камерлінг-Оннес (Heike Kamerlingh Onnes) (на мал. 5 справа) поставив собі за мету експериментально досягти абсолютного нуля за шкалою Кельвіна (приблизно мінус 273 градуси за Цельсієм). Вам відомо, що це – нижня межа температури у природі. Сорокарічний учений використав свої зв'язки з голландськими промисловцями і 1893 року розпочав у Лейденському університеті будівництво однієї з найкращих лабораторій у світі, оснащеної найсучаснішим обладнанням. Перший успіх не забарився: 10 липня 1908 року вченим вдалося отримати рідкий гелій за температури 5 K (мінус 268 градусів за Цельсієм). Ще два роки напруженої праці – і вони досягають температури 1 K! Але учений зрозумів, що це – межа, яку важко подолати на даному обладнанні. Він приймає рішення змінити напрямок наукових досліджень. Відтепер усі сили лабораторії були спрямовані на вивчення фізичних властивостей матеріалів за низьких температур. Зрозуміло, що програма досліджень передбачала вимірювання і питомого опору матеріалу. Багато вчених того часу висловлювали припущення, що за дуже низьких температур метали перетворюються на діелектрики. Начебто вільні електрони настільки сповільнюються, що „приклеюються“ до йонів і не здатні переносити електрику. Але фізика – наука, перш за все, експериментальна! Досліди Хейке Камерлінг-Оннеса продемонстрували, що опір платини у процесі охолодження не зростає, а



падає, і після 4 K не змінюється. Учений висловив припущення, що опір повинен прямувати до нуля, тому що йони припиняють коливальний рух і „не заважають“ рухові вільних електронів. Розуміючи, що платина містить домішки, він вирішив провести експерименти зі ртуттю, найбільш очищеним металом, який був у лабораторії.

8 квітня 1911 року група Хейке Камерлінг-Оннеса з асистентами Корнелісом Дорсманом (Cornelis Dorsman) і Гіллесом Хольстом (Gilles Holst) перевіряла роботу нового кріостату, приладу для підтримання низької температури у даному об'ємі. Учені вирішили заправити кріостат рідким гелієм, але потім встановили в ньому газовий термометр і помістили два зразки (із золота та ртуті), щоб виміряти їхній питомий опір. Вимірявши опір металів за температури 4,3 K, вирішили зменшити тиск у кріостаті над гелієм. Гелій почав швидко випаровуватися, і температура понизилася до 3 K. Експеримент тривав уже 9 годин! При повторному вимірюванні виявилось, що опір ртуті дорівнював нулю! Так було відкрито явище надпровідності.

На мал. 6 ви бачите історичний запис, який учений зробив у той день. У рамці – голландська фраза **Kwik nagenoeg nul** – „Опір ртуті практично нульовий“ (3 K). Наступне речення – **Herhaald met goud** – означає „Повторено із золотом“.

Критичну температуру переходу ртуті у надпровідний стан у той день не визначили, та й не було такої мети. Її виміряли у наступному експерименті,



Мал. 5.

Мал. 6.

Мал. 7.



проведеному 11 травня. Камерлінг-Оннес дійшов висновку, що ртуть втрачає опір при охолодженні до 4,2 К.

Далі відкриття слідували одне за одним. З'ясувалося, що не всі метали можна перевести у надпровідний стан. У 1912 році відкрили ще два надпровідники – свинець і олово. В 1914 році вчені встановили, що сильне магнітне поле руйнує надпровідність. Цього ж року вони провели експеримент з надпровідним свинцевим кільцем. У ньому індукували короточасний струм і впродовж декількох годин спостерігали циркуляцію струму без щонайменшого затухання. Кільце при цьому перетворювалося на магніт (мал. 7).

У 1919 році з Лейдена повідомили про відкриття надпровідних властивостей талію та урану.

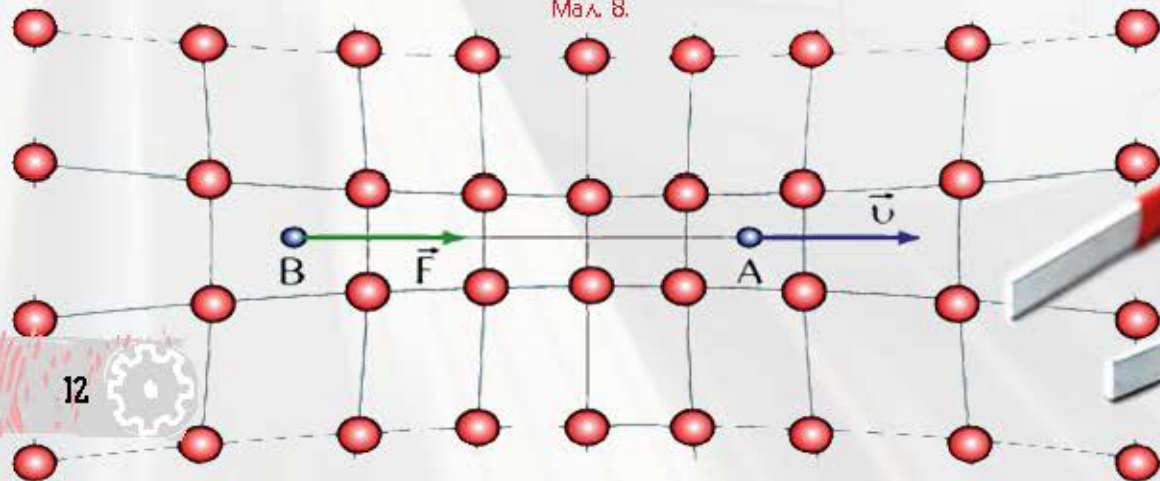
ПОЯСНЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ

Пояснити явище надпровідності з точки зору класичної фізики неможливо. Лише з розвитком квантової фізики 1957 року (через 46 років після відкриття надпровідності!) три американські фізики – Бардін, Купер і Шріффер пояснили надпровідність спарюванням електронів, тобто утворенням куперівських пар за рахунок обміну коливаннями кристалічної комірки – фононами.

Щоб зрозуміти, як утворюються куперівські пари, розглянемо дуже спрощену модель проходження струму у надпровіднику. Червоними кружечками позначені позитивні йони кристалічної решітки (мал. 8).

Коли електрон А під дією електричного поля рухається у просторі кристалічної решітки, він дещо викривлює її. Внаслідок цього концентрація позитивних йонів позаду нього зростає. Скупчення позитивних йонів притягує негативний електрон В з силою F . В результаті енергія, яку затратив електрон А для проходження кристалічної решітки, передається через коливання решітки електрону В. Таким чином, електрони А і В пов'язані між собою кристалічною решіткою, утворюють пару і загалом не витрачають енергії для руху. Опір струмові дорівнює нулю.

Мал. 8.



ЗАСТОСУВАННЯ НАДПРОВІДНИКІВ

Сучасна наука вже отримала надпровідні матеріали за температури 165 К (мінус 107 °С). Якщо б вдалося отримати надпровідники за кімнатної температури, це стало би величезним стрибком у розвитку людства. Адже третину електроенергії ми втрачаємо, передаючи її від джерела енергії до споживачів. Поки що доводиться охолоджувати надпровідники рідким азотом. Без них важко уявити роботу Великого адронного колайдера у ЦЕРНі і будівництво термоядерного реактора ITER у Кадараші.

Надпровідність характеризується також ефектом Мейснера: магнітне поле повністю витісняється з об'єму провідника. Внаслідок цього зразок зависає над магнітом.

На основі ефекту Мейснера вже створені поїзди на магнітній подушці (мал. 9), які можуть розганятися до швидкості 500 км/год.

Потужні магніти на надпровідниках використовуються у медицині для створення томографів, які працюють за принципом ядерно-магнітного резонансу (ЯМР). Сканування тканин людини дозволяє лікарям побачити на екрані комп'ютера зріз внутрішніх органів без операційного втручання. Такий метод дає змогу швидко поставити правильний діагноз, а, отже, швидше вилікувати пацієнта.

Сучасна квантова теорія надпровідності принципово не обмежує значення температури, за якої спостерігається це явище. Отже, справа за створенням нових матеріалів і сполук, які у найближчому майбутньому, можливо, відкриєте ви.

Мал. 9.

