

Наталія Татарчук

ЗОШИТ

**ДЛЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
І НАВЧАЛЬНИХ ПРОЕКТІВ**

**11
КЛАС**

ФІЗИКА

Рівень стандарту



ВИДАВНИЦЬ ДІМ
«ВЕСНА»

Харків

НАВЧАЛЬНІ ПРОЕКТИ

Проект 1

Залежність питомого опору металів від температури. Надпровідність

Корисна інформація

а) Для «фізиків-теоретиків»

Як відомо, питомий опір — фізична величина, що характеризує електричні властивості речовини й показує, який опір має виготовлений з даного матеріалу провідник завдовжки 1 м і площею поперечного перерізу 1 м² (або 1 мм²). Буквене позначення питомого опору — ρ . Питомий опір визначають з виразу для опору провідника:

$$R = \frac{\rho l}{S} \Rightarrow \rho = \frac{RS}{l},$$

де R — електричний опір; l — довжина провідника; S — площа його поперечного перерізу.

Одиниця питомого опору в СІ — 1 Ом \times м. На практиці частіше мають справу з провідниками, площі поперечного перерізу яких малі, тому використовують ще одну одиницю питомого опору — 1 $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Питомі опори металів досить малі порівняно з питомими опорами напівпровідників і тим паче діелектриків. У таблиці 1 наведено питомі опори деяких речовин.

Таблиця 1

Питомий електричний опір за температури 20 °С

Провідники

Речовина	ρ , 10 ⁻⁸ Ом \times м	Речовина	ρ , 10 ⁻⁸ Ом \times м
Срібло	1,6	Свинець	21
Мідь	1,7	Нікелін (сплав)	42
Золото	2,4	Манганін (сплав)	43
Алюміній	2,8	Константан (сплав)	50
Вольфрам	5,5	Ртуть	96

Речовина	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Речовина	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Латунь	7–8	Ніхром	1,1
Залізо, платина	10	Фехраль	1,3
Сталь	20		

Напівпровідники

Речовина	$\rho, 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Речовина	$\rho, 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Вуглець	0,035	Германій	500
Кухонна сіль	44	Кремній	2300

Діелектрики

Речовина	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Речовина	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Пісок	$0,3 - 10^3$	Гума	$10^{17} - 10^{18}$
Вода дистильована	$10^9 - 10^{10}$	Скло	$10^{15} - 10^{19}$
Деревина суха	$10^8 - 10^{11}$	Порцеляна	10^{19}
Слюда	$10^{14} - 10^{15}$	Ебоніт	10^{20}
Пінопласт	10^{17}	Повітря	$10^{21} - 10^{24}$

З таблиці 1 зрозуміло, що питомі опори різних речовин відрізняються в багато разів. Найменший питомий опір мають такі метали, як срібло, мідь, золото й алюміній, тому економічно вигідно виготовляти електропроводку для будівель і дрти для ліній електропередачі саме з міді та алюмінію. Найбільший питомий опір мають пінопласт, гума, скло, порцеляна, ебоніт, повітря. Гуму, порцеляну й ебоніт широко використовують в електротехніці як ізолятори.

Установлено, що значення питомого опору речовини зумовлене її хімічною природою та істотно залежить від температури. У тому, яке значення питомого опору має речовина, велику роль відіграють домішки. Вони збільшують питомий опір металів і зменшують його в напівпровідників та ізоляторів. Чим більша концентрація вільних носіїв заряду та їхня рухливість, тим питомий опір менший. У металах концентрація вільних електронів дуже велика та й рухливість набагато більша, ніж рухливість йонів в електролітах, тому питомий опір металів значно менший, ніж електролітів. Питомий опір напівпровідників має приблизно такі самі значення, як питомий опір електролітів. В ізоляторах вільні носії зарядів або відсутні, або рухливість їх надто мала, тому питомий опір дуже великий.

Опір металів протіканню електричного струму обумовлений сти-
каннями вільних електронів з йонами кристалічних ґраток, уна-

слідок чого вільні електрони віддають частину своєї енергії йонам. З підвищенням температури амплітуда коливань йонів у вузлах кристалічних ґраток збільшується, також зростає і швидкість руху вільних електронів. Результатом цього є збільшення кількості зіткнень електронів та йонів і зростання електричного опору металів та питомого опору.

Можна експериментально пересвідчитися, що залежність електричного опору та питомого опору металів від температури є лінійною:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t) \text{ та } \rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t),$$

де α — термічний (температурний) коефіцієнт опору; R_0 та ρ_0 — опір та питомий опір металу за температури 0°C відповідно; $\Delta t = t - t_0 = t$ — різниця кінцевої температури та початкової температури $t_0 = 0^\circ\text{C}$. З урахуванням останнього формули набувають вигляду:

$$R = R_0(1 + \alpha t) \text{ та } \rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

Графік залежності $\rho = \rho(t)$ — пряма лінія (рис. 1). Такий самий вигляд має графік залежності електричного опору металу від температури.

Термічний коефіцієнт опору — фізична величина, що показує, на скільки змінюється питомий опір речовини відносно початкового опору внаслідок зміни температури на 1 кельвін або на 1°C :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \Delta t}.$$

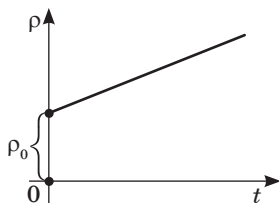


Рис. 1

Термічний коефіцієнт опору залежить від роду речовини.

Пояснимо причину збільшення опору металів із зростанням їхньої температури. Вільні електрони в металах беруть участь у двох рухах: хаотичному (тепловому) та напрямленому (під впливом електричного поля). Як відомо, температура — міра інтенсивності теплового руху, отже, з підвищенням температури кінетична енергія теплового руху електронів та йонів у вузлах кристалічних ґраток збільшується. Зі збільшенням кінетичної енергії збільшується й кількість зіткнень

вільних електронів з позитивними йонами. Позитивні йони притягують до себе вільні електрони й захоплюють їх. Кількість вільних електронів у металі зменшується, відповідно й сила струму зменшується, а електричний опір збільшується.

б) Для «фізиків-експериментаторів»

Експеримент 1

Дослідимо, як залежить опір металу від температури.

Обладнання для експерименту 1: акумулятор, металева спіраль, амперметр, спиртівка, з'єднувальні провідники.

1. Намотаємо декілька метрів тонкої (діаметром 0,1–0,2 мм) залізної дротини у вигляді спіралі.

Ввімкнемо її в електричне коло, що містить батарею гальванічних елементів і амперметр.

2. Опір дротини доберемо такий, щоб за кімнатної температури стрілка амперметра відхилялася майже на всю шкалу приладу.

3. Відмітивши показання амперметра, починаємо нагрівати дротину в полум'ї спиртівки. З підвищенням температури спіралі сила струму в колі зменшується.

Висновок: під час нагрівання опір металевого провідника зростає, відповідно збільшується й питомий опір.

Дослідним шляхом встановлено, що в деяких металів унаслідок нагрівання на 100 °С питомий опір зростає на 50 %. Утім, є сплави, у яких питомий опір з підвищенням температури не змінюється, наприклад, манганін і константан.

Експеримент 2

Визначимо термічний коефіцієнт опору.

Обладнання для експерименту 2: джерело струму (6 В); лампа (220 В); патрон зі шнуром; амперметр; вольтметр; з'єднувальні провідники.

1. Розглянемо написи на цоколі лампи. За робочими характеристиками лампи обчислимо її опір $R_{\text{роб}}$ у робочому стані.

2. Увімкнемо лампу в коло з джерелом значно нижчої напруги. Замкнемо коло та швидко виміряємо напругу на лампі й силу струму в колі. Обчислимо опір лампи $R_{\text{хол}}$ у холодному стані. Температуру в приміщенні вважатимемо $t_{\text{хол}} = 20$ °С.

3. Визначимо термічний коефіцієнт опору за наближеною формулою $\alpha = \frac{R_{\text{роб}} - R_{\text{хол}}}{R_{\text{хол}} (t_{\text{роб}} - t_{\text{хол}})}$. Прийmemo, що температура спіралі в робочому режимі $t_{\text{роб}} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Звіримо одержаний результат з табличним значенням (табл. 2).

Таблиця 2

Речовина	$\alpha, \frac{1}{\text{K}}; \frac{1}{^\circ\text{C}}$	Речовина	$\alpha, \frac{1}{\text{K}}; \frac{1}{^\circ\text{C}}$
Константан (сплав)	0,00002	Срібло	0,0041
Манганін (сплав)	0,00003	Мідь	0,0043
Нікелін (сплав), ніхром (сплав)	0,0001	Алюміній	0,0044
Свинець	0,0037	Вольфрам	0,0045
Платина	0,0039	Залізо	0,0065
Золото	0,004	Латунь (сплав), ртуть	0,001

Зрозуміло, що зі зниженням температури електричний опір і питомий опір металів лінійно зменшуються. Для електролітів, вуглецю та ще деяких речовин температурний коефіцієнт опору має від'ємні значення, оскільки їхній питомий опір з підвищенням температури зменшується.

в) Для «істориків від фізики»

Чи можливо зменшити опір металу до нуля?

Голландський вчений Гейке Камерлінг-Оннес (1853–1926) розв'язав цю проблему в 1911 році. Учений, поставивши собі за мету дослідження властивостей речовин за наднизьких температур. Він виявив, що опір деяких металів стрибком зникає за температур, близьких до абсолютного нуля. Так, опір ртуті, охолодженої в рідкому гелії до температури 4,2 К, раптово зник.

Учений записав: «Ртуть переходить у новий стан, який унаслідок його незвичайних електричних властивостей може бути названий надпровідним станом». Він також виявив зникнення опору за дуже низьких температур в олова, свинцю, талію (рис. 2).

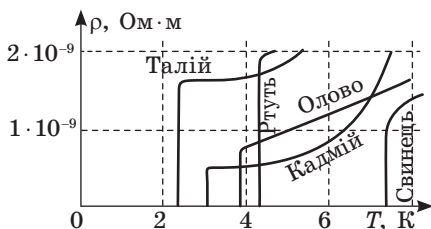


Рис. 2

Гейке Камерлінг-Оннес народився у вересні 1853 року в місті Гронінгені в родині власника цегляного заводу. Закінчив Гронінгенський університет й у віці 26 років захистив дисертацію (у якій запропонував новий доказ обертання Землі) та отримав ступінь доктора філософії. У 29 років він став професором Лейденського університету, де створив лабораторію експериментальної фізики. Учений починав працювати в невеликій лабораторії, а протягом кількох років реорганізував її. Камерлінг-Оннес у своїй лабораторії створив високопродуктивну на той час установку для скраплення газів. У 1906 році він налагодив напівпромислове виробництво (4 літри за годину!) скрапленого водню, а у 1908 році одержав скраплений гелій. Видатний учений зміг досягнути температури 1 К у 1909 році. (До слова, абсолютного нуля за більш ніж 100 років з того часу дослідники так і не досягли.)



Г. Камерлінг-Оннес

Камерлінг-Оннес був удостоєний Нобелівської премії з фізики в 1913 році «за дослідження властивостей речовини за низьких температур, що зробили можливим виробництво до виробництва

рідкого гелію». Продовжуючи дослідження вчений виявив, що надпровідність зникає в сильному магнітному полі. Він запропонував використовувати обмотку з надпровідних матеріалів для створення сильних магнітних полів. Камерлінг-Оннес брав участь у розробці методів використання низьких і наднизьких температур для виробництва льоду, зберігання продуктів харчування, створення вагонів-рефрижераторів. Під час Першої світової війни Камерлінг-Оннес організував в охоплені війною країни поставки продуктів для дітей, що голодували.

Професор користувався повагою в науковому світі, часто запрошував іноземних учених попрацювати у своїй лабораторії. Він був порядною та дуже скромною людиною, за що колеги, доброзичливо наділили його прізвиськом «Пан Абсолютний Нуль». Помер учений у лютому 1926 року, похований у Лейдені.

За життя Камерлінг-Оннес став не лише Нобелівським лауреатом, а й отримав інші почесні нагороди: медаль Румфорда Лондонського королівського товариства, золоту медаль Маттеуччі Національної академії наук Італії, медаль Франкліна Франкліновського інституту. Він був обраний членом Королівської академії наук в Амстердамі, був почесним доктором Берлінського університету, членом академії наук Відня, Галле, Геттінгена, Копенгагена, Турину, Уппсала.

Камерлінг-Оннес припускав, що пояснення явища надпровідності можливе лише на основі квантової теорії. За відкриття в області надпровідності після Камерлінг-Оннеса згодом були видані ще чотири Нобелівські премії з фізики.

У 1957 році Джон Бардін, Леон Купер і Дж. Роберт Шріффер (Нобелівські лауреати 1972 року) запропонували теоретичне пояснення явища надпровідності. За першими літерами прізвищ учених мікроскопічна теорія надпровідності набула назви — теорія БКШ. Вона вперше якісно пояснила відсутність опору провідників за низьких температур на основі квантових уявлень про рух вільних електронів у кристалічних ґратках. Теорія досить складна, викладати її тут не на часі.

Після відкриття Камерлінг-Оннеса надпровідність було виявлено в інших матеріалів і сплавів. Перехід у надпровідний стан відбувається за певної температури, яку називають критичною температурою надпровідного переходу (*Таблиця 3*). Необхідно зауважити, що срібло, золото, мідь, платина та деякі інші метали не стають надпровідними.

Таблиця 3

Речовина	Тип, К	Речовина	Тип, К
Чисті метали		Сплави	
Іридій	0,14	44 % Nb+56 % Ti	8,7
Титан	0,4	50 % Nb+50 % Zr	9,5
Молібден	1		
Алюміній	1,2	Хімічні сполуки	
Індій	3,4	V_3Ga	14,0
Олово	3,7	Nb_3Sn	18,2
Ртуть	4,2	Nb_3Ge	39
Тантал	4,5	MgB_2	77
Ванадій	5,3	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	135
Свинець	7,2	H_2S	203 (100 ГПа)
Ніобій	9,5		

У надпровідному стані змінюються теплові властивості речовини: теплоємність різко зростає, теплопровідність різко зменшується (крім деяких сплавів Pb–Bi), термоелектричні ефекти зникають. Через відсутність електричного опору струм, запущений у кільце з надпровідного матеріалу, продовжує текти після вимкнення напруги. Надпровідники — ідеальні діамагнетики. Магнітне поле не проникає всередину надпровідника, тому, наприклад, магніт, що падав на надпровідну пластину, зависає над нею в повітрі (рис. 3). Розгадка «левітації магніту» проста: поле магніту збуджує в надпровідній пластині кільцевий струм, той створює власне магнітне поле, що відштовхує магніт, який падає, — однойменні полюси відштовхуються. Струм продовжує текти, магніт висить доти, доки матеріал пластини залишається охолодженим до надпровідного стану.

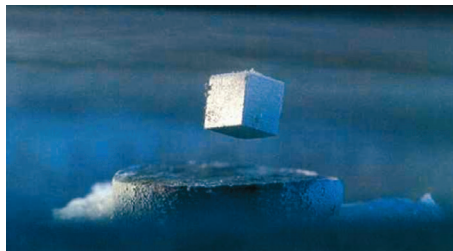


Рис. 3

Дослідження властивостей надпровідників продовжували вчені багатьох країн. Так, Айвер Джайєвер (Норвегія, США) та Лео Есакі (Японія) стали лауреатами Нобелівської премії з фізики в 1973 році за експериментальні відкриття тунельних явищ у напівпровідниках та надпровідниках. У 1987 році Нобелівську премію з фізики отримали Георг Беднорц (Німеччина) та Олександр Мюллер (Швейцарія) за відкриття надпровідності в керамічних матеріалах. У 2003 році Нобелівськими лауреатами стали Олексій Абрикосов (Росія, США), Віталій Гінзбург (Росія) та Ентоні Леггет (Велика Британія, США) за створення теорії надпровідності другого роду та теорії надплинності рідкого гелію.

Дослідження на цьому не припиняються, оскільки застосування надпровідників має великі перспективи.

г) Для «енергетиків»

Високотемпературні надпровідники знайдуть широке використання в електротехніці. Вони можуть забезпечити передачу електроенергії на великі відстані без утрат. За законом Джоуля—Ленца кількість теплоти Q , що виділяється струмом у провіднику, прямо пропорційна довжині l провідника та його питомому опору ρ : $Q = I^2 R t = I^2 \frac{\rho l}{S} t$. Під час передачі електроенергії від електростанцій до споживачів на сотні кілометрів теплові втрати енергії досить значні. Оскільки питомий опір напівпровідникового кабелю дорівнює нулю, то й теплових втрат не буде.

Ефективність виробництва, передачі та розподілу електроенергії підвищиться завдяки не лише зниженню втрат, а й за рахунок зменшення габаритів пристроїв. Наприклад, трансформатори з надпровідними обмотками котушок матимуть малу масу. Вони будуть екологічно безпечними, не потребуватимуть охолодження, а в разі перевантаження сила струму буде обмежена. Надпровідні обмежувачі струму менш інерційні.

У результаті ввімкнення надпровідних генераторів і накопичувачів електроенергії в електромережі підвищиться її стабільність. Електропостачання великих міст буде здійснюватися за допомогою надпровідних підземних кабелів, що проведуть більший струм. До того ж, це дозволить суттєво зекономити площу, оскільки такі силові кабелі будуть компактнішими. По надпровідному кабелю можна передавати значну потужність і за низької напруги. Це дозволить

знизити електромагнітне забруднення навколишнього середовища, що є актуальним, особливо в густонаселених регіонах, де збудовані високовольтні ЛЕП. Упровадження високотемпературних надпровідників у сферу нетрадиційної енергетики є також перспективним.

г) Для «спеціалістів з електротехніки»

Надпровідність на сьогодні є однією з найбільш досліджуваних областей фізики. На даний час розроблено надпровідники на основі металокераміки з критичною температурою переходу близько 164 К. Розширюються можливості використання надпровідності для турбогенераторів, топологічних генераторів, уніполярних машин, електродвигунів, магнітних сепараторів, жорстких і гнучких кабелів, комутаційних пристроїв, транспортних систем тощо. Також необхідно зазначити, що важливий напрям у дослідженнях надпровідності — це створення пристроїв для вимірювання температур, витрат, рівнів, тиску... Галузі використання надпровідності невпинно розширюються. В Україні, в Інституті проблем матеріалознавства, також розробляють високотемпературні надпровідники.

Залежність опору від температури використовують у різних вимірювальних приладах. Найважливішим з них є термометр опору. Це — резистор із платинової дротини (рис. 4), який вмикають в одне з плечей мостової схеми. Опір платини сталий у часі й добре вивчений у широкому інтервалі температур. Саме тому, вимірюючи опір платинової дротини, можна досить точно виміряти температуру. Такий термометр розташовують всередині тіла, температуру якого треба вимірити (наприклад, у пічі). Термометри опору мають перевагу над рідинними термометрами, оскільки можуть працювати і за досить високих, і за дуже низьких температур.

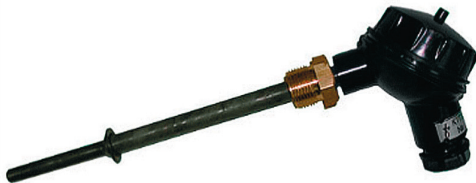


Рис. 4

Надпровідні кабелі (рис. 5) тепер використовують під час побудови суперелектромагнітів. По такому кабелю можна пропускати дуже великі струми (11 000 А), а сам надпровідник при цьому не

нагрівається. Недолік — значні витрати на підтримку кабелю в робочому стані, оскільки потрібно постійно підтримувати температуру кабелю $1,8 \text{ K}$ ($-271,35 \text{ }^\circ\text{C}$). Саме такі кабелі використані у великому адронному колайдері.

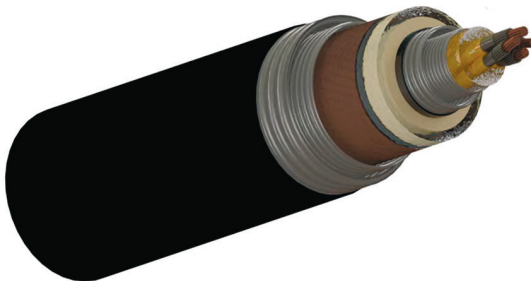


Рис. 5

Учені-фізики, інженери в багатьох країнах світу працюють над створенням найточніших приладів для фізичного експерименту — надпровідних гальванометрів і детекторів випромінювань, магнітних лінз для електронних мікроскопів, магнітних екранів, резонаторів з надпровідним покриттям для мікрохвильової техніки тощо.

Вимушені коливання. Резонанс

Корисна інформація

а) Для «фізиків-теоретиків»

Коливання — найпоширеніша форма руху в навколишньому світі. Вільні коливання — це коливання, що відбуваються під дією внутрішніх сил. Наприклад, вільними є коливання тіла на підвісі після того, як тіло відхилили від положення рівноваги та відпустили. Такі коливання швидко загасають, оскільки в реальних коливальних системах завжди є втрати енергії. Вони викликані наявністю тертя, опору зовнішнього середовища, утворенням механічних хвиль тощо. Поступово амплітуда вільних коливань зменшується, із часом коливання припиняються.

Вимушені коливання — це коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили. Наприклад, вимушеними є коливання голки в лапці швацької машинки, поршня в циліндрі двигуна внутрішнього згорання, мембрани телефону, океанічні припливи (під дією притягання Місяця), автомобіля на ресорах тощо. Вимушені коливання тривають доти, доки діє зовнішня сила. Робота зовнішньої сили забезпечує приплив енергії в коливальну систему ззовні. Приплив енергії не дає коливанням загаснути, незважаючи на дію сил тертя.

Особливу цікавість викликають вимушені коливання в системі, здатній здійснювати вільні коливання. Із цим стикалися всі, кому доводилося гойдатися на гойдалці.

Гойдалка — це маятник, тобто коливальна система з певною власною циклічною частотою ω_0 . Якщо почати підштовхувати гойдалку вперед щоразу, коли вона дійде до відповідного крайнього положення, можна із часом розгойдати її до великої амплітуди. При цьому енергія гойдалки поповнюється за рахунок сили м'язів людини. Якщо гойдалці надавати поштовхи безладно, то гойдалка не тільки не розгойдається, а може, навіть, зупинитися.

Резонанс — явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань. Резонанс можливий, коли частота дії зовнішньої сили збігається з власною частотою коливальної системи. При цьому амплітуда коливань досягає максимального значення, яке в багато разів може перевищувати амплітуду вільних коливань.

У перекладі з французької резонанс — відголосок, відлуння, відгомін.

На рисунку 1 зображено залежності коливань тіла, що здійснюють вимушені коливання, від частоти дії зовнішньої сили. Пік на кожному з трьох графіків спостерігається в той момент, коли циклічна частота ω дії зовнішньої сили збігається з власною циклічною частотою коливальної системи ω_0 . На графіку 1 пік більш різко виражений, ніж на графіку 2, а на графіку 3 — сильно згладжений. Це залежить від сил тертя, що діють у коливальній системі. Чим менше тертя, тим «гостріший» резонанс. В ідеальному випадку, коли тертя відсутнє або ним нехтують, амплітуда коливань зростає до нескінченності.

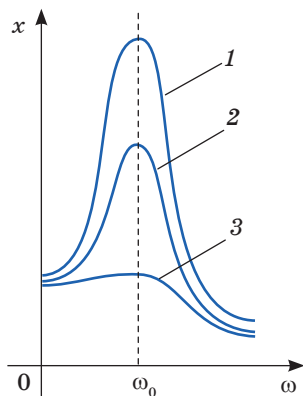


Рис. 1

б) Для «фізиків-експериментаторів»

Експеримент 1

Обладнання: два штативи з муфтами та лапками; цупка нитка завдовжки 1 м; п'ять нитяних маятників, які прив'язуємо до цупкої нитки таким чином, як показано на рисунку 2.

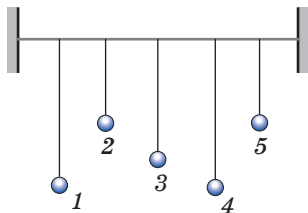


Рис. 2

1. Склали установку з горизонтально закріпленої товстої нитки, до якої підвісили 5 нитяних маятників з різною довжиною підвісу. Утім, маятники 1 і 4 мають підвіси однакової довжини так само, як і маятники 2 та 5.
2. Виводимо маятник 1 з положення рівноваги й відпускаємо. Спостереження за іншими маятниками дає можливість помітити, що всі маятники із часом стали коливатися, а маятник 4 — з найбільшою амплітудою.

Висновки:

1) усі маятники прийшли в коливальний рух, оскільки коливання маятника 1 відіграли роль періодичної зовнішньої сили, під впливом якої почали коливатися інші маятники;

2) максимально розгойдалися маятники, довжини підвісів яких однакові. Це відбулося тому, що періоди (а отже, і частоти) маятників 1 та 4 однакові, тобто частота дії зовнішньої сили (маятника 1) дорівнює власній частоті коливальної системи (маятника 4). Ми спостерігали резонанс.

3. Повторимо дослід ще раз, вивівши з положення рівноваги маятник 2. Який маятник тепер розгойдається найбільше? Звичайно, маятник 5.

Експеримент 2

Обладнання: два однакових камертони на резонаторних ящиках, молоточок, шматочок пластиліну (рис. 3).

1. Установимо камертони вздовж однієї прямої таким чином, щоб отвори в резонаторних ящиках були звернуті один до одного. По ніжці камертона А ударяємо молоточком С. Через кілька секунд гасимо коливання першого камертона рукою. Ясно чути мемо звучання камертона В, по якому не вдарили.

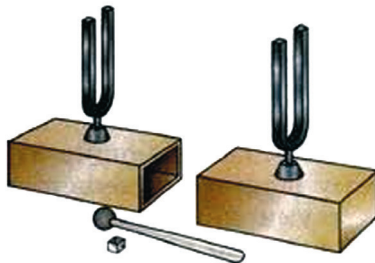


Рис. 3

2. Прикріпимо до ніжки камертона *A* шматочок пластиліну та повторимо дослід. Удар молоточком викликав звучання камертона *A*, але звук змінився. Після гасіння рукою коливань камертона *A*, не чути звучання камертона *B*.

Висновки:

1) спостерігали явище акустичного (звукового) резонансу. Оскільки частоти коливань камертонів однакові (440 Гц), то звукова хвиля від камертону *A* збуджує коливання в камертоні *B*, які добре чути, тому що амплітуда коливань зростає внаслідок резонансу;

2) шматочок пластиліну змінив власну частоту коливань камертона *A*. Камертон *B* не зазвучав, оскільки частоти коливань камертонів тепер не збігаються, резонанс не виник.

Експеримент 3

Обладнання: морська мушля (рапан)

1. Якщо піднести до вуха морську мушлю (рис. 4), то почується «шум моря». Кожен може в цьому переконатися. Чому ми чуємо «шум моря»?

У деяких джерелах з Інтернету написано, що «шум моря» в мушлі створюється шумом крові у вусі людини. В інших авторів описано повторення досліду в звукоізолюваному приміщенні, де «шум моря» в мушлі не чути. Отже, це не може бути шумом крові.



Рис. 4

Виявляється, що «шум моря» є насправді результатом резонансу всередині мушлі від шуму навколишнього середовища. Коли зовнішній шум проникає всередину мушлі, то багато разів відбивається від її стінок і підсилюється. Чим більше шуму ззовні, тим голосніший

«шум моря». На «шум моря» впливає форма та розміри мушлі, оскільки мушлі різної форми вловлюють коливання різної частоти.

Експеримент 4

Обладнання: штатив з муфтою і лапкою; металева кулька на підвісі, закріплена в лапці штатива.

1. Чи можливо розгойдати нитяний маятник, періодично дмухаючи на нього видихнутим повітрям?

Почнемо дмухати на кульку, зберігаючи періодичність. Через деякий час маятник сильно розгойдається. Хоч сила подиху й мала, але кожний наступний видих на кульку підсилював дію попереднього. Коли власна частота коливань маятника та частота видихів збіглися, то маятник сильно розгойдався внаслідок резонансу.

Такий дослід був описаний Галілео Галілеєм ще в 1638 році.

в) Для «противників резонансу»

Резонанс — небажане явище.

На зорі розвитку авіації деякі авіаційні двигуни спричинювали настільки сильні резонансні коливання частин літака, що літак повністю руйнувався в повітрі. Причиною резонансу елементів літальних апаратів та їхнього руйнування могло стати таке явище, як флатер — поєднання самозбудних незагасаючих згинальних і крутильних коливань елементів конструкції (здебільшого крил літаків або несучих гвинтів гелікоптерів). Одним із шляхів боротьби із цим явищем є використання протифлатерних вантажів. Кріплення двигунів (рис. 5) на пілонах крил літаків — не примха авіаконструкторів, а нагальна потреба, оскільки двигуни є своерідним протифлатерним вантажем, що демпфірує коливання крила в польоті.



Рис. 5

Відомі випадки, коли морські кораблі входили в резонанс за певних частот обертання гребного валу, що викликало їхнє руйнування. Суднобудівельникам траплялося перебудовувати велетенські океанічні лайнери, щоб уникнути резонансу внаслідок збігу частоти власних коливань корпусу та частоти зміни змушуючої сили, що виникала під час роботи двигунів.

Чому військовим колонам під час проходження по мостах потрібно йти не стройовим, а вільним кроком? Причина — досвід кількох катастроф у минулому.

12 квітня 1831 року зруйнувався Бротонський підвісний міст через ріку Ірвелл в Англії під час проходження по ньому військового загону. Воїни крокували «в ногу», частота кроків збіглася з власною частотою коливань мосту, амплітуда коливань зросла, міст зруйнувався. Два десятки людей було травмовано.

У 1850 році так само зруйнувався підвісний ланцюговий міст завдовжки понад 100 метрів над рікою Мен поблизу міста Анже у Франції. По мосту крокував батальйон піхоти чисельністю 500 чоловік, 226 з них загинули.

У 1868 році в місті Чатем (графство Кент, Англія) зруйнувався міст на опорах під час проходження загону британської піхоти.

Причиною руйнування мостів через резонанс також можуть стати залізничні потяги. Щоб уникнути резонансу, потяг має рухатися по мосту або повільно, або дуже швидко. Це потрібно для виключення збігу частоти ударів коліс по стиках рейок із власною частотою коливань мосту. У Києві перед мостом Метро потяги метрополітену завжди збавляють хід, щоб не сталася катастрофа. На сучасних мостах ділянки рейок часто будують суцільними, тобто без стиків.

7 листопада 1940 року в США резонанс спричинив руйнування Такомського підвісного мосту завдовжки 1800 метрів. Виник резонанс не під час проходження по мосту військових підрозділів, а внаслідок періодичної дії вітру, так званого аеродинамічного флатера.

Під час Другої світової війни резонанс поставив під загрозу «Дорогу життя» по льоду Ладозького озера, що сполучала блокадний Ленінград з неокупованою територією країни. Після проходження по тонкому льоду важкої вантажівки нерідко наступна легко навантажена машина чомусь провалювалася під лід (рис. 6).



Рис. 6

У південній частині Ладозького озера під мінометним та артилерійським вогнем ворога вчені-гідрографи та гідротехніки проводили дослідження крижаного покриття, визначали граничні навантаження на лід, вивчали деформації льоду внаслідок поширення вибухових хвиль. Під час проходження автоколон спостерігалися невідомі раніше коливання крижаного покриття: водяна хвиля, що утворювалася під льодом, який просідав, рухалася зі сталою для певної глибини озера та товщини льоду швидкістю. Хвиля могла відставати чи випереджати навантаження на лід, але коли швидкість хвилі збігалася зі швидкістю руху колони автомобілів, наставав резонанс, лід руйнувався. За результатами досліджень були встановлені норми швидкостей для пересування автомашин по льоду, що дозволило практично уникнути жертв. «Дорога життя» дала можливість кожному місту боротися й вистояти.

Шкідливі прояви резонансу доводиться долати під час обробки металів різанням. На металорізальних верстатах за певних режимів різання збуджуються коливання інструменту та оброблюваної деталі. Якщо не усунути причину коливань, то погіршується якість обробки деталі, точність її виготовлення, швидше зношується верстат.

Резонанс може чинити негативну дію на організм людини, наприклад, під час прослуховування голосної музики через навушники. Шкідливо впливає також через вібрацію відбійного молотка під час ремонтних робіт на дорогах. Інфразвуки великої інтенсивності через збіг частот з коливаннями внутрішніх органів можуть призвести до

порушень у роботі практично всіх органів, навіть до зупинки серця та пошкодження кровоносних судин.

Землетруси, або сейсмічні хвилі, а також робота технічних пристроїв, що сильно вібрують, можуть викликати руйнування будівель, а землетруси в океані спричиняють велетенські резонансні хвилі — цунамі — зі значною руйнівною силою.

Документально відомо, що під час деяких виступів всесвітньо відомого співака Федора Івановича Шаляпіна лопалися плафони в люстрах. Так само іноді лопаються кришталеві фужери під час співу оперних дів. Причиною цих явищ є резонанс, коли частота власних коливань скляних виробів збігається із частотою акустичних хвиль, відтворених співаком чи співачкою.

Усі наведені приклади підтверджують шкідливість резонансу.

г) Для «захисників резонансу»

Резонанс — корисне явище.

З урахуванням досвіду, набутого вченими в 1942 році під час досліджень на Ладозькому озері, пізніше був розроблений резонансний метод руйнування льоду. Енергоємність такого методу в кілька разів менша від енергоємності руйнування крижаного покриву за допомогою криголамів і криголамного начіпного обладнання.

Метод розчинення порошкового молока у воді на підприємствах харчової промисловості, заснований на використанні резонансу, дозволив скоротити час перебігу процесу розчинення та покращити якість готової продукції.

Проблеми подрібнення гірських порід і речовин, що особливо гостро стоять перед гірничодобувною та хімічною промисловістю, також удалося розв'язати з використанням явища резонансу.

В умовах резонансу працюють випромінювачі в системах ультразвукового контролю та діагностики, які широко використовують у різних галузях промисловості, а також у медицині.

Ядерно-магнітний резонанс — дуже інформативний метод діагностики захворювань. Він виявляє ракові пухлини на ранніх стадіях, дає можливість помітити найменші порушення в роботі мозку, діагностувати захворювання хребта тощо. Магнітно-резонансна томографія (МРТ) — метод медичної візуалізації з використанням явища ядерного магнітного резонансу, що його використовують для детального зображення внутрішніх структур організму. Переваги МРТ над іншими методами медичних досліджень: а) заміна рентгенівських променів

радіохвилями, що завдає значно меншої шкідливості для організму; б) чутливість до окремих ізотопів, особливо до Гідрогену, одного з найпоширеніших елементів м'яких тканин; в) зображення судинного русла з визначенням параметрів кровотоку; г) велика роздільна здатність — можна побачити об'єкти розміром з десяти частки міліметра; ґ) можна отримати не лише поперечні зображення, а й поздовжні.

Нарешті, користь від резонансу має кожна людина, у якої є слух. Німецький фізик і лікар-фізіолог Герман Гельмгольц (1821–1894) пояснив функціонування органа слуху людини, спираючись на явище резонансу. Коливальні рухи найсильніше збуджують ті кортієві дуги (що розташовані у внутрішньому вусі), котрі налаштовані на частоту певного звуку, тобто, за теорією Гельмгольца, розрізнення звуків за тембром і висотою відбувається на основі резонансу.

Резонанс дає можливість дитині чи дорослій людині розгойдатися на гойдалці й отримати позитивні емоції.



Герман Гельмгольц

г) Для «техніків»

Будова частотоміра — приладу для вимірювання частоти змінного струму — базується на явищі резонансу. Існують частотоміри різних конструкцій. Найпростіший вібраційний механічний частотомір (рис. 7, а, б) має ряд пружних пластин 5, закріплених од-

ним кінцем на спільній основі 3. Пластини різної довжини та маси дібрано таким чином, щоб частоти їхніх власних коливань склали деяку дискретну шкалу (рис. 7, а), за якою визначають значення частоти. Принцип дії резонансних частотомірів заснований на порівнянні частоти вхідного сигналу з власною частотою резонатора приладу. По обмотці 1 електромагніта протікає змінний струм. Якір 2 електромагніта періодично притягується та відштовхується відповідно до частоти струму, тобто здійснює вимушені коливання. Оскільки якір приєднано до основи частотоміра, то механічні коливання основи збуджують вібрацію пластин, при цьому найбільша амплітуда коливань буде в тій пластині, власна частота коливань якої збігається з вимірюваною частотою. Частотомір за допомогою жорсткого закріплення 4 можна жорстко закріпити.

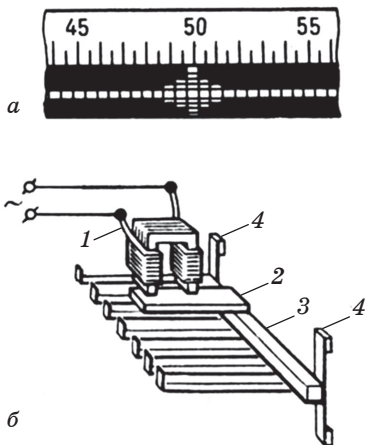


Рис. 7

Часто для зменшення амплітуди коливань використовують різні заспокійливі пристрої — демпфери. Призначені для зменшення амплітуди механічних, електричних та інших коливань, вони працюють на принципі поглинання частини енергії коливальної системи. Застосовують повітряні, рідинні, магнітно-індукційні демпфери різноманітних конструкцій. Основне застосування демпфери знайшли в підвісках транспортних засобів. Амортизатор керма — теж демпфер. Він призначений для поглинання коливань, що виникають під час рульового управління. Існують демпфери для струн музичних інструментів. Часто демпфери використовують в електричних колах, в електричних машинах, в електровимірювальних приладах.

На рисунку 8 зображено електровимірювальний прилад електромагнітної системи. Якщо ввімкнути прилад в електричне коло, стрілка під дією спіральної пружини 1 здійснить коливання. Щоб вони швидше припинилися, використовують демпфер 2 у вигляді коробочки, у якій рухається пластинка, зв'язана з віссю стрілки. Рух цієї пластинки збільшує опір повітря в системі, і коливання швидко загасають.

Застосування демпферів забезпечує рівномірну роботу систем, що, у свою чергу, підвищує безпеку та дає можливість контролювати та регулювати процеси різного роду.

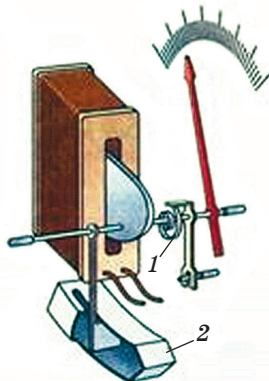


Рис. 8

Замкнути або відкрити вхідні двері в квартиру чи дверцята автомобіля можна не лише звичайним ключем, а й звуком певної частоти, а також електронним сигналом певної частоти. Для цього створено резонансні замки та ключі, у яких використовують явище резонансу в коливальному електричному контурі.

Існує кілька можливостей для зменшення шкідливого впливу резонансу:

- а) зміна частоти власних коливань;
- б) введення іншої зовнішньої дії в протифазі до першої зовнішньої дії;
- в) самонейтралізація шкідливої дії шляхом поділу на дві дії та зсуву однієї частини по фазі;
- г) введення додаткового вантажу зі змінним центром тяжіння.

У будівельній галузі запобіганню виникненню резонансу приділяють велику увагу. Будівлі, у яких установлюють машини, двигуни й верстати, що працюють на великих швидкостях, мають споруджувати таким чином, щоб виключити можливість виникнення вібрації

фундаменту, стін чи перекриття із частотою, яка дорівнювала б частоті коливань машин і верстатів.

У Японії під час землетрусів часто руйнувалися залізобетонні конструкції, а старовинні пагоди — ні. Виявилося, що всередині кожної пагоди була вертикально підвішена довга дерев'яна балка з вантажем унизу. Частота коливань цього своєрідного маятника була дібрана таким чином, що під час землетрусу він розгойдувався в протифазі з будівлею, допомагаючи гасити коливання.

У багатьох країнах світу будують хмарочоси. Залізобетонний каркас має витримувати силу вітру, що на великій висоті може набувати швидкості 150 км/год. У деяких хмарочосах на найвищому поверсі встановлюють рухому противагу масою кілька сотень тонн, що нейтралізує вітрові навантаження на конструкцію. В інших хмарочосах на даху встановлюють величезний резервуар з водою. Через велику масу та інерційність коливання води відстають від коливань будівлі. У результаті коливання хмарочоса здебільшого загасають.

Особливо широко явище резонансу використовують у радіотехніці для підсилення коливань. Резонанс дає можливість виокремити сигнали даної радіостанції з великої кількості сигналів інших радіостанцій, навіть якщо ті працюють на дуже близьких частотах.

д) Для «музикантів»

Як показати хору, що виконує багатоголосний твір без інструментального супроводу (а капела), з якого звуку почати співати? Як перевірити, чи правильно настроєно фортепіано, скрипку, віолончель?

Для цього існує камертон (рис. 9), який було винайдено в 1711 році. Найчастіше камертон виготовляють зі сталі у вигляді двозубої виделки, на місці згинання якої є ручка з кулькою на кінці.



Рис. 9

Для підсилення звуку камертон закріплюють на дерев'яному ящику — резонаторі. Коливання камертона передаються резонатору, стінки його починають вібрувати, що, у свою чергу, передається повітрю всередині.

Якщо правильно дібрати розміри ящика, виникає резонанс, і звук підсилюється. Зазвичай камертони настроєні на

частоту 440 Гц (звук *ля* першої октави), але є камертони, що настроєні інакше. Виготовляють також камертони іншої форми — у вигляді трубочки, у яку треба подмухати. Знаючи, як звучить одна нота, можна правильно настроїти музичний інструмент. Отже, камертон — прилад, що потрібен настройщикам музичних інструментів, співакам, що співають без інструментального супроводу, диригентам хорів та... вчителям фізики для демонстрацій.

До речі, порожнина рота — резонатор, що підсилює звуки.

Явище резонансу лежить в основі проектування й створення багатьох музичних інструментів: рояля, скрипки, віолончелі, гітари, флейти, саксофона, гобоя та ін.

Резонаторами є труби духових музичних інструментів, корпуси струнних інструментів. Вони мають складну форму, унаслідок цього різні частини корпусу резонують на різних частотах, що збагачує тембр музичного інструмента. Порожнини в корпусах мають такі форми та об'єми, що підсилюють звуки, добуті за допомогою струн.

Наприклад, резонаторний ящик акустичної гітари, утворений двома деками та боковиною, має особливу форму, завдяки якій відстань від розетки (вхідного й вихідного отвору для звуків) до стінок ящика у різних місцях не однакова. Це дозволяє повітрю резонувати всередині на різних частотах. Набір цих частот визначає загальний тембр інструмента. До того ж, розміри резонатора мають відповідати строю інструмента, інакше його тембр буде спотвореним.

Насамкінець прозвучать музичні твори у виконанні учнів класу чи в запису.

Проект 3

Фотоефект. Застосування фотоефекту. Сонячні батареї

Корисна інформація

а) Для «фізиків»

Фотоефект — явище виходу електронів з речовини під дією світла. Розрізняють зовнішній і внутрішній фотоефект.

Зовнішній фотоефект (фотоелектронна емісія) — вихід електронів з поверхні металу під дією світла (точніше, під дією електромагнітних хвиль видимого та ультрафіолетового діапазонів).

Російський учений Олександр Григорович Столетов (1839–1896) експериментально встановив три закони фотоефекту:

1) сила фотоструму прямо пропорційна інтенсивності світлового потоку;

2) максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає із частотою світла та не залежить від його інтенсивності;

3) для кожної речовини існує *червона межа фотоефекту*, тобто така мінімальна частота світлової хвилі (або максимальна довжина хвилі), для якої можливий фотоефект.

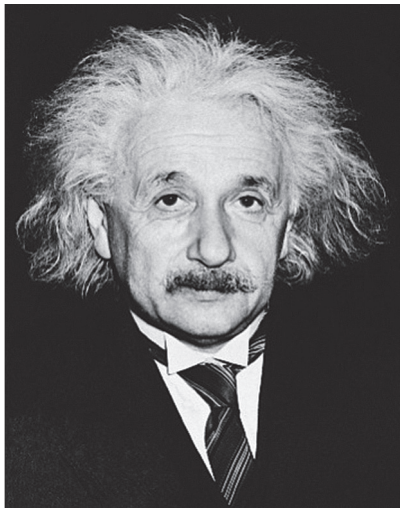


Олександр Григорович Столетов

Теорію фотоелектру створив німецький фізик Альберт Ейнштейн (1879–1955). У 1905 році він пояснив і математично обґрунтував установлені експериментально закони фотоелектру:

1) інтенсивність світлового потоку прямо пропорційна кількості фотонів; чим більше фотонів поглине речовина, тим більше електронів вилетить з її поверхні, отже, збільшиться сила струму;

2) енергія фотона E , як відомо, дорівнює: $E = h\nu$, де h — стала Планка; ν — частота світлової хвилі; електрон одержує цю енергію та витрачає її частину (або всю) на здійснення роботи виходу з поверхні металу $A_{\text{в}}$; залишок отриманої від фотона енергії визначає кінетичну енергію електрона $W_{\text{к}}$: $E - A_{\text{в}} = W_{\text{к}}$; переписавши останнє рівняння, маємо: $h = A_{\text{в}} + W_{\text{к}}$, звідки зрозуміло, що чим більша частота світла, тим більшою буде й кінетична енергія фотоелектронів;



Альберт Ейнштейн

3) може статися, що енергії фотона не вистачить на те, щоб електрон здійснив роботу виходу з поверхні металу, тоді фотоелектр не відбуватиметься; щоб почався фотоелектр, потрібно, щоб енергії фотона вистачило на здійснення роботи виходу: $h_{\text{мін}} = A_{\text{в}}$; мінімальну частоту світла, за якої починається фотоелектр, назвали *червоною межею фотоелектру* тому, що червоне світло має найменшу частоту в спектрі видимого випромінювання та практично не викликає фотоелектр; оскільки залежність між частотою світла та довжиною

хвилі обернено пропорційна: $h_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}}$, де c — швидкість світла у вакуумі, то мінімальна енергія фотона, достатня для початку фотоефекту, така: $h_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} = A_{\text{в}}$.

Необхідно зауважити, що рівняння $h = A_{\text{в}} + W_{\text{к}}$ називають рівнянням Ейнштейна для фотоефекту. За створення теорії фотоефекту Альберт Ейнштейн отримав Нобелівську премію з фізики 1921 року.

Вольт-амперну характеристику фотоефекту наведено на рисунку 1. Зі збільшенням напруги фотострум зростає, оскільки все більше й більше фотоелектронів досягає анода. За напруги $U_{\text{нас}}$ струм перестає збільшуватися — досягає насичення ($I_{\text{нас}}$). Це означає, що всі вирвані з поверхні катода електрони досягають анода. Якщо напруга між катодом та анодом дорівнює нулю, струм не зникає. Це свідчить про те, що електрони мають певну кінетичну енергію після вилітання з катода, тому вони можуть досягнути анода й без впливу електричного поля. Для того щоб фотострум припинився, необхідно прикласти обернену (запірну) напругу $U_{\text{з}}$, за якої жоден з електронів, що вилетіли з катода, не досягне анода.

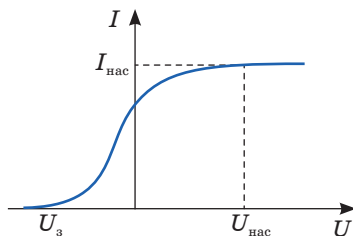


Рис. 1

Внутрішній фотоефект — збільшення електропровідності напівпровідників під дією світла. За звичайних умов чисті напівпровідники мають великий питомий опір, оскільки кількість вільних носіїв заряду (електронів та дірок) досить мала. У напівпровідниках валентні електрони слабо зв'язані з атомами. Отримавши надлишкову енергію під час опромінення, валентні електрони відриваються від атомів і стають вільними носіями заряду. Відповідно зростає і кількість дірок. На відміну від зовнішнього фотоефекту вільні електрони не виходять з напівпровідника, а залишаються в ньому. Оскільки під час освітлення напівпровідника кількість вільних носіїв

заряду (пар електрон–дірка) збільшується, то його провідність різко зростає. Подальші дослідження показали, що таке явище можливе і в діелектриках.

б) Для «істориків»

Уперше явище фотоелектру експериментально спостерігав у 1887 році німецький фізик Генріх Герц (1857–1894). Досліджуючи електроіскрові вібратори, він установив, що провідник, освітлений ультрафіолетовими променями, швидко втрачає заряд, а електрична іскра виникає за меншого значення напруги. Пояснити це явище Герц не зміг.

Олександр Григорович Столетов, який створив установку для дослідження фотоелектру, зміг пояснити дослід Герца.



Генріх Герц

У лютому 1888 року Столетов виконав дослід, що продемонстрував зовнішній фотоелектр і показав характер впливу світла на провідник. Учений використав джерело ультрафіолетових променів (електричну дугу), електрометр та цинкову пластину, яку спочатку зарядив негативно, а потім — позитивно. Коли цинкову пластину зарядили негативно, стрілка електрометра відхилилася на кілька поділок шкали. Після освітлення пластини світлом електричної дуги стрілка електрометра швидко перейшла у вертикальне положення, що свідчило про відсутність заряду на пластині. Коли ж пластина

була заряджена позитивно (рис. 2), то після опромінення стрілка електрометра залишалася нерухомою. Отже, позитивний заряд із пластини нікуди не зник. Столетов зробив висновок з досліду: ультрафіолетове проміння вириває з металу негативно заряджені частинки (електрон був відкритий лише в 1897 році, пізніше дослідів Столетова), а позитивно заряджені частинки лишаються в металі. У першому випадку негативно заряджені частинки, що покинули пластину, додатково відштовхуються електричним полем пластини, тому негативний заряд так швидко зникає з неї. Відкрите ним явище вчений назвав активно-електричним розрядом.

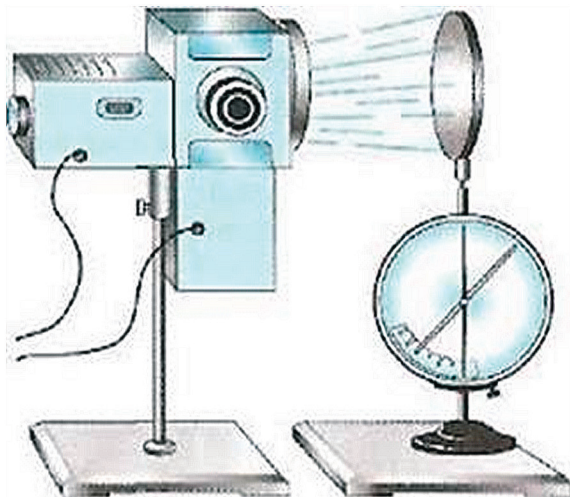


Рис. 2

Для постановки точних дослідів Столетов створив прилад, що став прообразом сучасних фотоелементів. Скляний балон, з якого відкачали повітря, мав кварцове віконце для пропускання ультрафіолетових променів (рис. 3). Усередину балона поміщалися електроди — катод (К) та анод (А). Катод був чутливий до світла (фотокатод). Чутливий гальванометр реєстрував появу струму одразу після освітлення катода. Столетов установив залежність фотоструму від напруги та від інтенсивності світлового пучка.

Електронну природу фотоелекту встановили в 1899 році англійський фізик Джозеф Джон Томсон, який відкрив електрон, та в 1900 році.

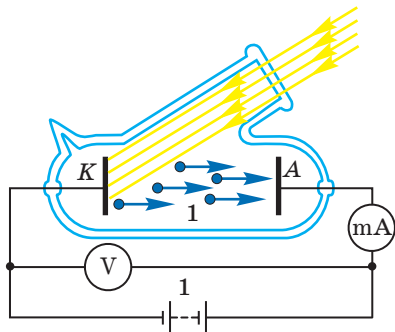


Рис. 3

Дослід Столетова, з огляду на знання про електрон та кванти світла, можна пояснити таким чином (рис. 4):

1) заряджена негативно пластина має на своїй поверхні багато зайвих вільних електронів. Коли електромагнітне випромінювання падає на метал, частина його відбивається поверхнею, а інша частина поглинається поверхневим шаром. Під час поглинання один фотон віддає свою енергію одному електрону, який здійснює роботу виходу з поверхні металу. Оскільки пластина й електрон мають заряди одного знаку (негативні), то електрон відштовхується від пластини та вилітає з неї. Чим більше поглинається фотонів, тим більше вилітає фотоелектронів, звичайно, якщо енергія поглинутого фотона більша або дорівнює роботі виходу електрона з поверхні металу;

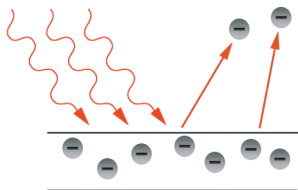


Рис. 4

2) коли дослід повторили з позитивно зарядженою пластинною, на якій була нестача вільних електронів, то, якщо електрон і виривався з поверхні металу під дією опромінення, але одразу ж повертався на пластину (різноїменні заряди притягуються). До того ж, чим більше електронів вилітало з позитивно зарядженої пластини, тим більшим ставав її позитивний заряд. Саме тому стрілка електрометра не рухалася, позитивний заряд залишився на пластині й після опромінення.

З історією відкриття внутрішнього фотоелектричного ефекту пов'язана історія створення сонячних батарей.

«Сонячні батареї» — умовна назва пристроїв, які перетворюють променеву енергію Сонця на електроенергію.

У 1839 році французький фізик Антуан Сезар Беккерель винайшов хімічну батарею, яка під дією світла виробляла електроенергію. ККД цієї батареї становив усього 1 %.

Внутрішній фотоелектричний ефект був уперше виявлений американським фізиком Уїллоубі Смітом у 1873 році. Учений помітив, що в досліджуваного провідного селенового кабелю за яскравого освітлення зменшувався електричний опір. Це відкриття дозволило створити сонячні батареї.

У 1877 році британець Джон Адамс (1819–1892) та американець Артур Дей (1869–1960) виявили, що селен під дією світла виробляє електричний струм.

Американський учений і винахідник Чарльз Фрітц (1850–1903) у 1883 році використав покритий золотом селен як перший сонячний елемент, ККД якого був близько 1 %. Саме Фрітц передбачив, що невдовзі будуть створені сонячні батареї, які стануть джерелом електроенергії поряд з тепловими та іншими електростанціями.

Кілька десятиліть прогресу в створенні сонячних елементів з використанням кремнію не було, доки в середині ХХ століття не накопичилися достатні знання про властивості напівпровідникових матеріалів. У 1954 році Гордон Пірсон, Дерріл Чапін і Кел Фуллер створили кремнієвий сонячний елемент з ККД 4 %. Пізніше вони доопрацювали його настільки, що ККД зріс до 15 %. Уперше сонячні батареї були використані в сільських місцевостях та віддалених містечках як джерело енергії для систем телефонного зв'язку. Оскільки потужність одного сонячного елемента невелика, тому їх стали об'єднувати в батареї.

У серпні 2009 року вчені університету Нового Південного Уельсу (Австралія) досягли в лабораторних умовах рекордної ефективності сонячних батарей: ККД становив 43 %! Світло перед попаданням на сонячні батареї було сфокусовано спеціальними лінзами.

Роботи з удосконалення сонячних батарей продовжуються вченими в багатьох країнах світу.

в) Для «інженерів»

Явище фотоелектричного ефекту широко використовують у техніці.

Найпростішим приладом, що працює на зовнішньому фотоелектричному ефекті, є вакуумний фотоелемент (рис. 5), що його застосовують у фотометрії

(для вимірювання сили світла, яскравості, освітленості), у кіно (для відтворення звуку), у фототелеграфах і фототелефонах. У поєднанні з електричними підсилювачами вони входять до складу різних реле, що слугують для управління виробничими процесами. Фотоелементи працюють «контролерами» в метро, своєчасно гасять ліхтарі на вулицях, вмикають і вимикають бакени на річках, рахують виготовлену продукцію, контролюють якість обробки деталей тощо.

Вакуумний фотоелемент складається зі скляної колби, менша частина якої прозора для світла, а більша частина зсередини вкрита шаром 1 світлочутливого металу, що є фотокатодом. Анодом є металеве кільце 2, закріплене в центрі колби. Під дією світла з катода вилітають фотоелектрони. Під впливом електричного поля вони рухаються до анода, і в колі протікає струм. Як тільки світловий потік перебивається, струм припиняється, і електричне коло одразу розмикається.

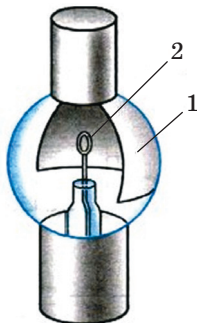


Рис. 5

Існують напівпровідникові фотоелементи, у яких під дією світла змінюється концентрація носіїв струму. Саме їх використовують у сонячних батареях, принцип роботи яких заснований на внутрішньому фотоелекті.

Елемент (рис. 6) кремнієвої сонячної батареї — це пластинка кремнію з домішкою елемента 5-ї групи Періодичної системи елементів (напівпровідник *n*-типу), що оточена шаром кремнію завтовшки близько 1 мкм з домішкою елемента 3-ї групи (напівпровідник *p*-типу), з контактами для приєднання зовнішнього кола. Принцип роботи сонячних фотоелементів заснований на *p-n*-переході. У результаті поглинання фотона в прилеглий до *p-n*-переходу області створюється пара електрон-дірка. Або електрон, або дірка є неоснов-

ним носієм заряду в напівпровіднику певного типу, тому неосновний носій заряду легко проникає крізь перехід. Пара електрон–дірка розділяється в просторі, частинки не можуть рекомбінувати. Під дією поля електрони відкидаються в *n*-область, а дірки — у *p*-область. Це означає, що виникає електрорушійна сила — фото-ЕРС. Її величина досягає приблизно 0,5 В. Після замикання кола такий елемент може створювати струм до 25 мА з 1 см² освітлюваної поверхні.



Рис. 6

На каркас сонячної батареї окремі сонячні елементи закріплюють таким чином, щоб у разі виходу з ладу одного його можна було легко замінити. Для захисту від зовнішніх пошкоджень усю сонячну панель (рис. 7) покривають шаром міцного пластику або скла.

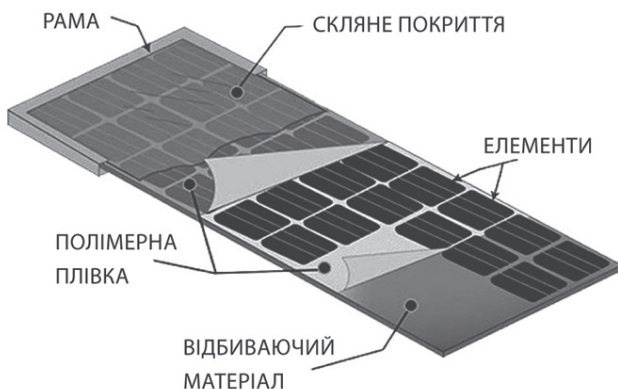


Рис. 7

г) Для «енергетиків»

Виробництво сонячних батарей сьогодні є актуальним, оскільки вони є джерелами енергії в широкому спектрі галузей економі: у телекомунікації, медицині, мікроелектроніці, космічній галузі. Їх застосовують у годинниках та мікрокалькуляторах, автомобілях, для опалення будівель тощо. Сонячні батареї — головна складова сонячних електростанцій (СЕС), на яких у світі виробляється трохи більше 1 % електроенергії.

Прихильники сонячної енергетики стверджують, що кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на земну поверхню за рік, кілька разів вистачило б для забезпечення потреб людства в електроенергії. Нещодавно, у 2017 році, сумарна потужність установлених сонячних батарей склала 90 ГВт, що дорівнює потужності енергогенеруючої системи такої країни, як Туреччина. Собівартість сонячної енергетики може конкурувати з традиційними джерелами енергії навіть без застосування такого стимулу для виробників, як «зелений тариф».

До основних переваг використання сонячних панелей як джерела електроенергії відносять:

- а) невичерпність запасів сонячної енергії;
- б) економічну ефективність
- в) високу екологічність;
- г) можливість установлення у важкодоступних місцях, у віддалених від цивілізації регіонах;
- д) можливість установлення на невеликій площі (наприклад, на даху власного будинку та на нерівних поверхнях (гнучкі сонячні батареї (рис. 8));
- е) легка заміність окремих елементів без виходу з ладу всієї сонячної панелі;
- ж) можливість установлення на орбітальних станціях, супутниках.

Сонячні батареї мають і недоліки:

- а) термін служби сучасних сонячних батарей недостатньо великий (близько 25 років);
- б) панель може вийти з ладу в разі порушення герметичності

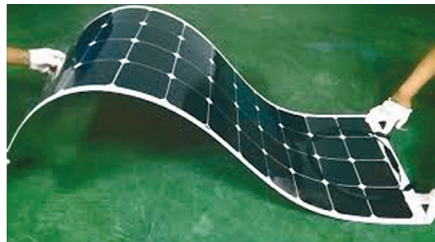


Рис. 8

поверхні: при цьому внаслідок потрапляння вологи можуть піддатися корозії доріжки, що з'єднують кремнієві елементи, або зникнути струмопровідні контакти;

в) на Землі є регіони, де дуже мало сонячних днів на рік, тому там недоцільно встановлювати сонячні батареї.

На сьогоднішній день на ринку збуту пропонують батареї трьох типів: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Батареї кожного із цих типів мають свої переваги перед іншими. Їхнє використання залежить від мети встановлення, місця розташування та фінансових можливостей покупців. Наприклад, полікристалічні сонячні батареї використовують для освітлення дворів, парків, вулиць, шосе, лікарень, кафе, шкіл, приватних будинків, для заряджання акумуляторів, енергопостачання нафтопроводів та газопроводів. Тонкоплівкові сонячні батареї застосовують для більших систем електропостачання (СЕС), зрідка для побутових потреб.

Удосконалення технології виробництва, підвищення ККД і зниження вартості сонячних батарей сприяло тому, що сонячна енергетика вже змінила промислову електроенергетику.