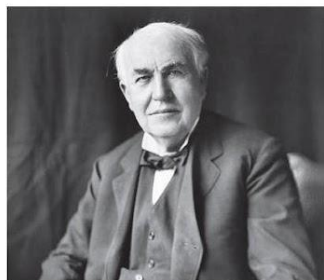


§ 8. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ. ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ПРИЛАДИ



Томас Едісон
(1847–1931)

У 1883 р. американський винахідник *Томас Едісон*, намагаючись збільшити термін служби свого винаходу — електричної лампи розжарювання, увів у балон лампи, з якого було відкачано повітря, електрод. Приєднавши електрод до позитивного полюса джерела струму, а нитку розжарення лампи — до негативного, Едісон спостерігав появу струму. А от коли електрод був з'єднаний з негативним полюсом джерела, а нитка розжарення — з позитивним полюсом, струм не виявлявся. Про те, чому у вакуумі існував струм і чому лампа Едісона мала однобічну провідність, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1

Термоелектронна емісія

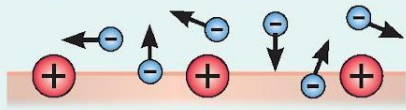
Щоб розібратися, що являє собою струм у вакуумі, спочатку визначимося з поняттям вакууму.

Вакуум (від латин. *vacuum* — порожнеча) — це стан газу за тиску, який менший від атмосферного.

Розрізняють *низький, середній, високий (глибокий) вакууми*. Коли кажуть про електричний струм у вакуумі, мають на увазі **високий (глибокий) вакуум** — стан газу, за якого довжина вільного пробігу молекул газу більша за лінійні розміри ємності, в якій міститься газ.

Види електронної емісії

- *Термоелектронна емісія* — випромінювання електронів нагрітими тілами.

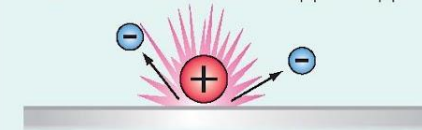


- *Фотоелектронна емісія* відбувається під дією випромінювання, яке падає на поверхню тіла.



- *Автоелектронна емісія* зумовлена наявністю біля поверхні тіла сильного електричного поля, яке «вириває» електрони з металу.

- *Вторинна електронна і йонно-електронна емісії* — випромінювання електронів із поверхні тіла внаслідок його бомбардування електронами або йонами відповідно.



- *Вибухова електронна емісія* — емісія електронів унаслідок переходу мікроскопічних ділянок катода в плазму (локальний вибух).

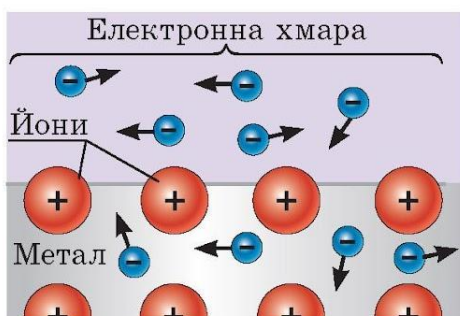


Рис. 8.1. Електрони, що покинули метал, утримуються біля його поверхні електричним полем, створеним електронною хмарою та некомпенсованими позитивними йонами металу

Щоб у вакуумі існував струм, слід помістити у вакуумі джерело вільних заряджених частинок, наприклад електронів. Найбільша концентрація вільних електронів — у металах. Однак вільні електрони зазвичай не можуть залишити поверхню металу — вони утримуються силами кулонівського притягання з боку позитивних йонів. Для подолання цих сил електрону необхідно мати певну енергію.

Енергію, яку необхідно мати електрону, щоб залишити метал, називають **роботою виходу** $A_{\text{вих}}$.

Електрон може залишити метал, якщо його кінетична енергія E_k буде більшою за роботу виходу або буде дорівнювати їй:

$$E_k \geq A_{\text{вих}}, \text{ або } \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$$

Роботу виходу електронів вимірюють в *електрон-вольтах* ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), визначають експериментально для кожного металу окремо та заносять до таблиць (див. Додаток 1).

Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають **електронною емісією**. Залежно від того, як була передана електронам необхідна енергія, розрізняють кілька видів емісій (див. колонку зліва). Щоб створити електричний струм у вакуумі, найчастіше використовують **термоелектронну емісію** — процес випромінювання електронів нагрітими тілами.

У нагрітому металі є величезна кількість швидких електронів, які безперервно з нього вилітають. Саме тому біля поверхні металу утворюється *хмара вільних електронів* — **електронна хмара**, що має *негативний заряд*, а сама поверхня металу набуває *позитивного заряду* (рис. 8.1). Під впливом електричного поля, створеного електронною хмарою та поверхнею металу, деякі електрони повертаються в метал. У стані рівноваги кількість електронів, що залишили метал, дорівнює кількості електронів, що повернулися в нього. При цьому чим вища температура металу, тим більша густина електронної хмари.

Погодьтеся: описана «поведінка» електронів дуже нагадує «поведінку» молекул біля поверхні рідини, а електронна хмара асоціюється з насиченою парою біля поверхні рідини.

2 Електричний струм у вакуумі. Вакуумний діод

Ви вже знаєте, що для існування струму необхідно виконання двох умов: *наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля*.

Для створення цих умов у скляний балон поміщують два електроди (катод і анод) і відкачують із балона повітря. Катод нагрівають, використовуючи нитку розжарення — тонкий дріт із тугоплавкого металу, підключений до джерела струму. У результаті з поверхні катода вилітають електрони. Щоб збільшити емісію електронів, катод покривають шаром оксидів лужноземельних металічних елементів (Барію, Стронцію, Калію тощо), для яких робота виходу електронів є невеликою. На катод подають негативний потенціал, а на анод — позитивний (*пряме ввімкнення*). Електрони, що вилетіли з катода, потрапляють в електричне поле між катодом і анодом і починають рухатися напрямлено, створюючи електричний струм (рис. 8.2).

Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів, отриманих у результаті електронної емісії.

Пристрій, що складається зі скляного балона, з якого відкачано повітря, і розташованих у балоні двох електродів (анода і підігрівного катода), називають **вакуумним (ламповим) діодом** (рис. 8.3). Очевидно: якщо подати на катод позитивний потенціал, а на анод — негативний (*зворотне ввімкнення*), то електрони, що вилітають із катода, будуть відкидатися полем назад, на катод, і струму в колі не буде. Таким чином, *вакуумний діод має односторонню провідність* (рис. 8.4).

? Чому в 1883 р. Т. Едісон не зміг пояснити причину того, що його лампа розжарювання з введеним додатковим електродом мала односторонню провідність?

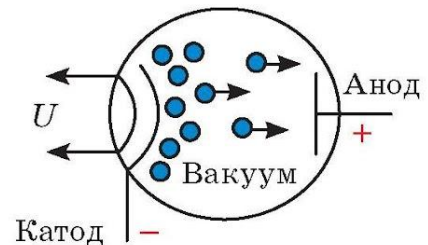


Рис. 8.2. Термоелектрони (електрони, що вилетіли з металу в ході термоелектронної емісії), рухаючись від катода до анода, створюють електричний струм

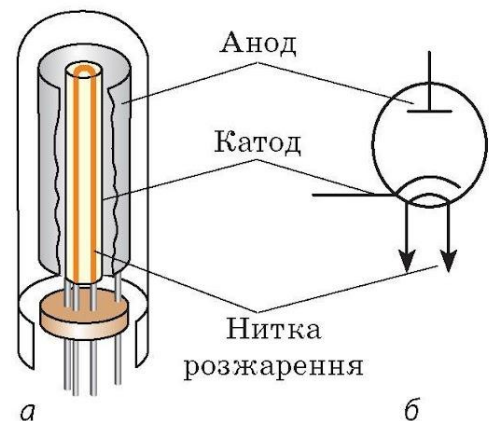


Рис. 8.3. Вакуумний діод:
а — будова;
б — позначення на схемі

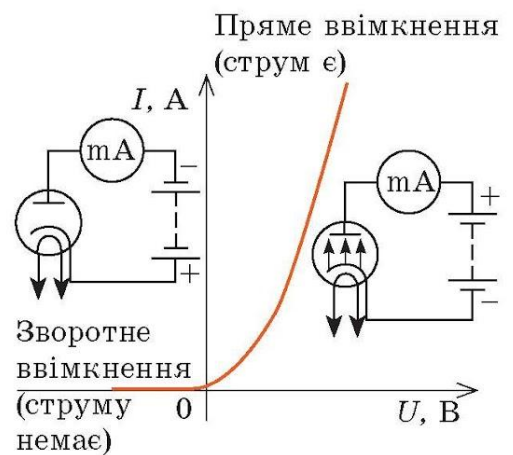


Рис. 8.4. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) вакуумного діода. *Пряме ввімкнення:* зі збільшенням напруги між електродами сила струму швидко зростає. *Зворотне ввімкнення:* сила струму дорівнює нулю

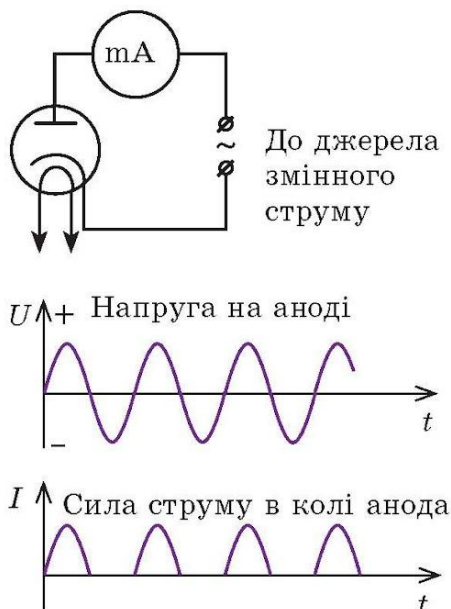


Рис. 8.6. Використання вакуумного діода для перетворення змінного струму на пульсуючий

Зварювання у відкритому космосі

25 липня 1984 р. радянські космонавти *Володимир Джанібеков* і *Світлана Савицька* вийшли у відкритий космос і протягом трьох годин здійснювали перше космічне зварювання в умовах глибокого вакууму.

Зварювальний апарат був розроблений і створений в *Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ*. Апарат дозволяв здійснювати зварювання, спаювання, різання і нагрівання металу. Ці операції виконувалися короткофокусною електронно-променевою гарматою масою 2,5 кг, яку слід було тримати в руці.



Поштова марка України:
«Зварювання в космосі», 2006 р.

Свого часу однобічну провідність вакуумного діода активно використовували в радіоелектроніці для перетворення змінного струму на пульсуючий. Якщо між катодом і анодом увімкнути джерело змінного струму, то протягом першого півперіоду діод пропускати електричний струм, а протягом другого півперіоду електрони відштовхуватимуться від анода і струму в лампі не буде (рис. 8.6). Отже, струм у колі буде незмінного напрямку, але пульсуючим. У сучасній електроніці замість лампових (вакуумних) діодів використовують напівпровідникові (див. § 9).

3 Електронні пучки: їх властивості та застосування

Якщо в аноді лампового діода зробити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, влетить у цей отвір і створить за анодом **електронний пучок** — *потік електронів, які швидко рухаються*.

Властивості електронних пучків:

- 1) спричиняють нагрівання тіл у разі потрапляння на їх поверхню;
- 2) викликають появу рентгенівського випромінювання в разі швидкого гальмування;
- 3) викликають світіння деяких речовин і матеріалів (так званих люмінофорів);
- 4) відхиляються електричним і магнітним полями.

Першу властивість використовують для плавлення надчистих металів, для зварювання, спаювання та різання металів у вакуумі. Другу властивість використовують у рентгенівських трубках: під час різкого гальмування електронного пучка виникають електромагнітні хвилі частотою понад $2 \cdot 10^{17}$ Гц. Третю і четверту властивості використовують в *електронно-променевих трубках* — вакуумних пристроях з керованим електронним пучком і спеціальним екраном, який світиться в місцях потрапляння електронів (рис. 8.7). Електронно-променева трубка тривалий час була основним елементом *осцилографа* — пристрою для дослідження змінних процесів в електричних колах.

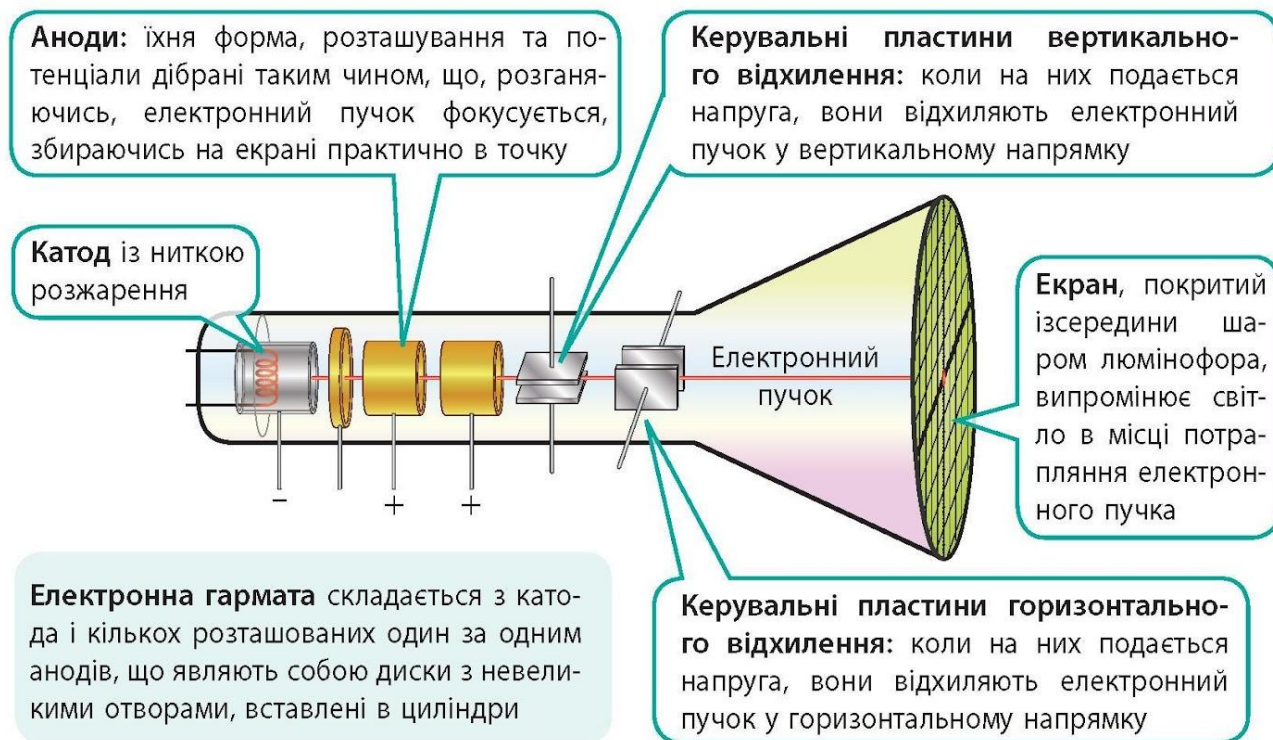


Рис. 8.7. Принципова будова електронно-променевої трубки з електростатичним керуванням електронним пучком



Підбиваємо підсумки

- Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів. Для створення струму у вакуумі необхідно джерело електронів, у ролі якого використовують металеві провідники, нагріті до високої температури, опромінені світлом тощо.
- Енергію, яку має витратити електрон, щоб залишити поверхню металу, називають роботою виходу. Електрон може залишити метал, якщо кінетична енергія електрона буде більшою за роботу виходу або дорівнюватиме їй:

$$\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$$
Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають електронною емісією.
- Термоелектронна емісія — процес випромінювання електронів нагрітими тілами. Явище термоелектронної емісії набуло широкого застосування у вакуумних електронних пристроях, наприклад у вакуумних лампах й електронно-променевих трубках.



Контрольні запитання

- Що являє собою електричний струм у вакуумі?
- У чому полягає явище електронної емісії?
- За якої умови електрон може залишити поверхню провідника?
- Опишіть процес утворення електронної хмари.
- Чому вакуумний діод має односторонню провідність?
- Де застосовують вакуумні діоди?
- Назвіть основні властивості електронних пучків. Де їх застосовують?
- Назвіть основні частини електронно-променевої трубки. Якими є їхні функції?



Вправа № 8

1. Установіть відповідність між потенціалами керувальних пластин електронно-променевої трубки та напрямком відхилення світної точки на її екрані (рис. 1).

1 $\varphi_1 = \varphi_2$, $\varphi_3 > \varphi_4$	А Відхиляється вгору
2 $\varphi_1 > \varphi_2$, $\varphi_3 > \varphi_4$	Б Відхиляється вниз
3 $\varphi_1 < \varphi_2$, $\varphi_3 = \varphi_4$	В Відхиляється ліворуч
	Г Відхиляється праворуч угору
2. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб вилетіти з поверхні катоду, покритого барій оксидом?
3. В електронно-променевої трубці потік електронів проходить прискорювальну різницю потенціалів 10 кВ. Якої середньої швидкості набувають електрони? Вважайте, що початкова швидкість руху електронів дорівнює нулю.
4. У більшості електронно-променевих трубок керування електронним пучком відбувається за допомогою магнітного поля. На рис. 2 електронний пучок відхиляється вліво. Згадайте правило лівої руки та визначте, як напрямлено керувальне магнітне поле, які котушки його створюють і який напрямок струму в цих котушках.

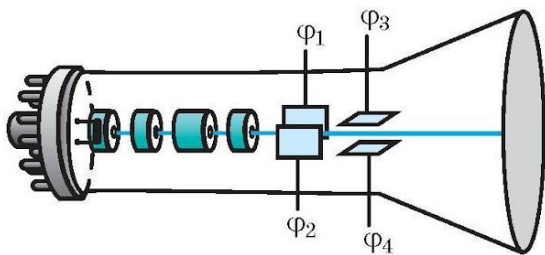


Рис. 1

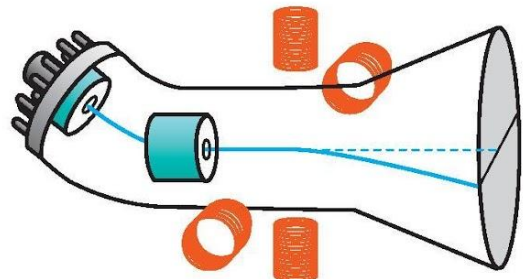


Рис. 2

5. Сучасні ТВ-панелі працюють на рідких кристалах або світлодіодах, мають товщину кілька сантиметрів й так мало важать, що кріпляться на стіні за допомогою магнітів. А якими були телевізори першого покоління? Дізнайтеся.

Фізика і техніка в Україні



Вадим Євгенович Лашкар'ов (1903–1974) — видатний український радянський науковець, із ім'ям якого пов'язані становлення та розвиток фізики і техніки напівпровідників в Україні. В. Є. Лашкар'ов — один із «батьків» транзистора. Зараз без цього пристрою не працює жоден електронний прилад.

Вадим Євгенович народився в Києві, навчався в Київському інституті народної освіти. Згодом на запрошення академіка А. Ф. Йоффе він очолив лабораторію в Ленінградському фізико-технічному інституті. Дослідження В. Є. Лашкар'ова з розподілу електронної густини в кристалах виявилися настільки значними, що в 1935 р. ученому було присуджено науковий ступінь доктора фізико-математичних наук без захисту дисертації.

У 1939 р. В. Є. Лашкар'ов повернувся до Києва і почав працювати в Інституті фізики Академії наук УРСР. У 1941 р. вчений експериментально виявив *p-n*-перехід у купрум(II) оксиді. В. Є. Лашкар'ов не тільки відкрив *p-n*-перехід і дослідив вплив домішок на це явище — в 1946 р. учений виявив біполярну дифузію нерівноважних носіїв електричного струму, а в 1948 р. побудував загальну теорію фото-ЕРС у напівпровідниках.

Визнанням видатних наукових результатів В. Є. Лашкар'ова стало створення в 1960 р. Інституту напівпровідників АН УРСР, який учений очолив. Із 2002 р. Інститут фізики напівпровідників НАНУ носить його ім'я.

Джерело: Фізика. Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти
за ред. Бар'яхтара В.Г., Довгого С.О. – Харків, «Ранок», 2019р