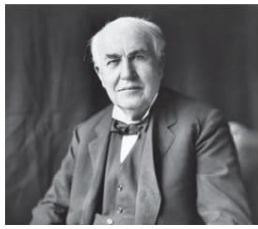


§ 8. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ. ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ПРИЛАДИ



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

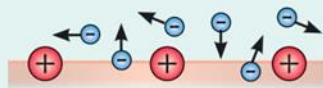
Щоб розібратися, що являє собою струм у вакуумі, спочатку визначимося з поняттям вакууму.

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).



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.

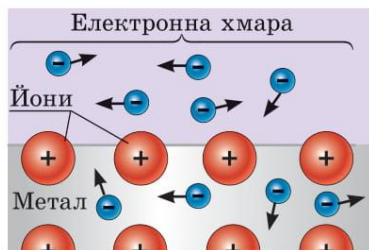


Рис. 8.1. Електрони, що покинули метал, утримуються біля його поверхні електричним полем, створеним електронною хмарою та некомпенсованими позитивними йонами металу

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?

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.

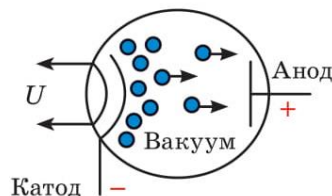


Рис. 8.2. Термоелектрони (електрони, що вилетіли з металу в ході термоелектронної емісії), рухаючись від катода до анода, створюють електричний струм

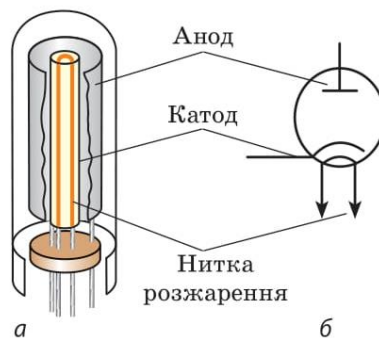


Рис. 8.3. Вакуумний діод: а — будова; б — позначення на схемі

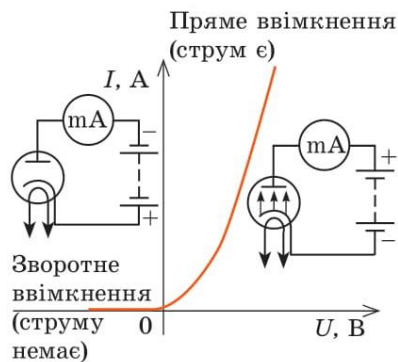


Рис. 8.4. Воль-амперна характеристика (ВАХ) вакуумного діода. *Пряме ввімкнення:* зі збільшенням напруги між електродами сила струму швидко зростає. *Зворотне ввімкнення:* сила струму дорівнює нулю

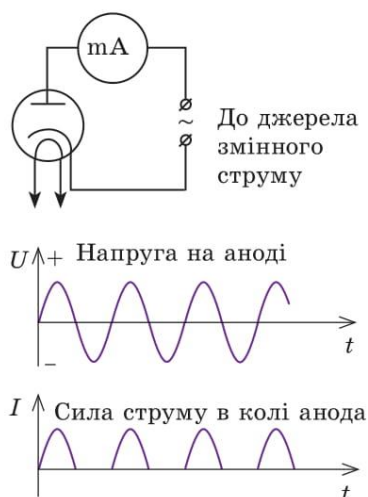


Рис. 8.6. Використання вакуумного діода для перетворення змінного струму на пульсуючий

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.

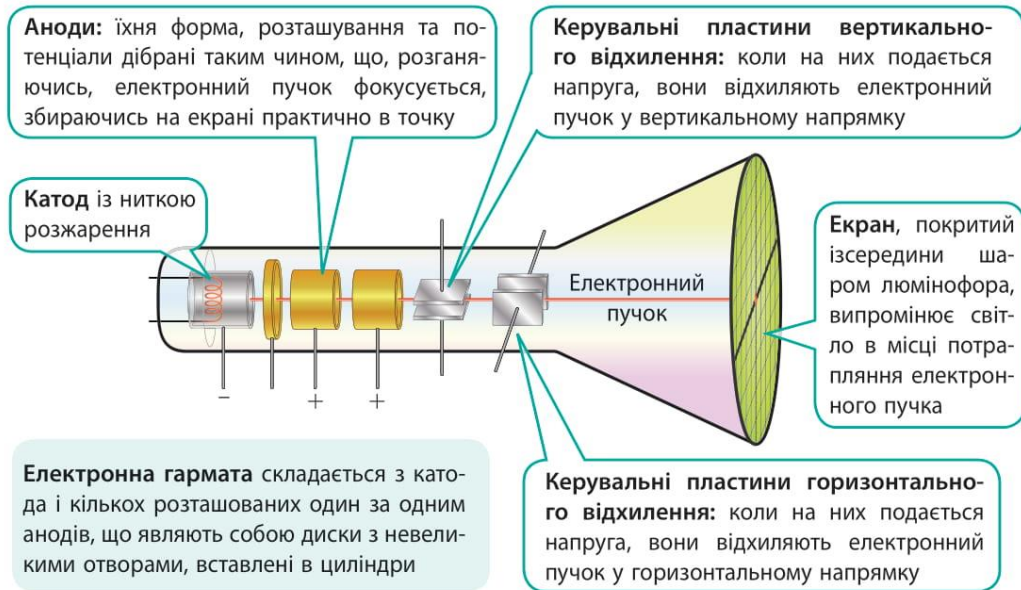


Рис. 8.7. Принципова будова електронно-променевої трубки з електростатичним керуванням електронним пучком



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.

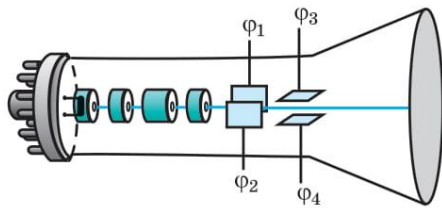


Рис. 1

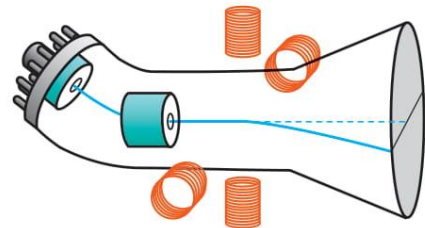


Рис. 2

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. Иоффе 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(І) 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.