

§ 15. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ. ПЛАЗМА ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ



Яскраві (а іноді й небезпечні) явища: блискавка, полярне сяйво, моторошні для необізнаної людини «вогні святого Ельма», різнобарвне світіння газових трубок, сліпуче світло під час зварювання металу, — усе це приклади різних самостійних газових розрядів. Від чого залежить і як виникає той чи інший електричний розряд у газах, ви дізнаєтеся з цього параграфу.

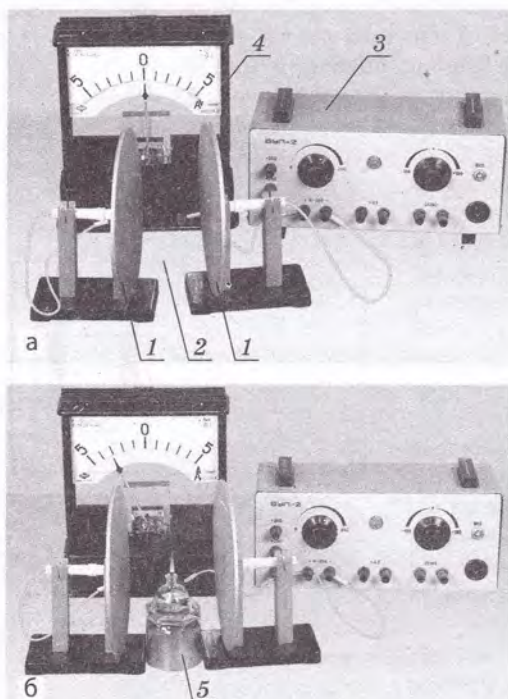


Рис. 15.1. Експеримент із вивчення провідності газів: 1 — металеві пластини; 2 — повітряний проміжок; 3 — потужне джерело струму; 4 — гальванометр; 5 — спиртівка. За звичайних умов повітря не проводить електричного струму (а); у разі внесення в повітряний проміжок запаленої спиртівки повітря стає провідником (б)

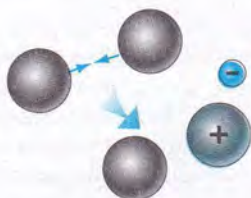


Рис. 15.2. Схема йонізації молекули газу. Втративши в результаті зіткнення електрон, молекула стає позитивним йоном

1

Механізм провідності газів

Складемо електричне коло з потужного джерела струму, гальванометра та двох металевих пластин (рис. 15.1, а). Пластини відсунуті одна від одної, отже, між ними є повітря. Замкнувши коло, побачимо, що стрілка гальванометра не відхиляється. Таким чином, за звичайних умов повітря не проводить електричного струму.

Помістимо між металевими пластинами запалену спиртівку і побачимо, що стрілка гальванометра відхиляється (рис. 15.1, б). Це означає, що в повітрі з'явилися вільні заряджені частинки і воно почало проводити електричний струм. З'ясуємо, що це за частинки, звідки і як вони з'явилися.

Полум'я нагріває повітря, й кінетична енергія теплового руху молекул (атомів) повітря збільшується. Тепер у разі їхнього зіткнення електрон може відірватися від молекули (атома) та стати вільним. Втративши електрон, молекула (атом) стає позитивним йоном (рис. 15.2). Відрив електрона від атома потребує витрат певної енергії — *енергії йонізації* W_i . Енергію йонізації зазвичай виражають у електрон-вольтах (eB): $1\text{eB} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Енергія йонізації залежить від хімічної природи газу та енергетичного стану електрона в атомі. Так, для відриву першого електрона від атома Нітрогену витрачається енергія 14,5 eB, для відриву другого електрона — 29,5 eB, для відриву третього — 47,4 eB.

Під час теплового руху електрон, зіткнувшись із нейтральною молекулою чи атомом, може «прилипнути» до них — таким чином утвориться негативний йон (рис. 15.3).

Процес утворення в газі позитивних і негативних йонів та вільних електронів з молекул (атомів) називають **йонізацією**.

Слід звернути увагу на той факт, що газ може стати йонізованим не тільки в результаті підвищення його температури, але й унаслідок впливу інших чинників. Наприклад, верхні шари атмосфери Землі йонізуються під дією космічних променів; сильний йонізаційний вплив на газ мають рентгенівські промені й т. д.



Рис. 15.3. Схема утворення негативних йонів у газі: електрон «прилипає» до нейтральної молекули

2 Що таке газовий розряд

Електричний струм у газах являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

Електричний струм у газах інакше називають **електричним** або **газовим розрядом**. Якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (наприклад, прибрати пальник у досліді на рис. 15.1), то газовий розряд припиняється.

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**.

З'ясуємо, чому після припинення дії йонізатора газовий розряд припиняється.

По-перше, у процесі теплового руху позитивний йон може наблизитися до електрона і притягти його, у результаті чого утвориться нейтральна молекула (атом) газу. Цей процес називають **рекомбінацією** (рис. 15.4). Унаслідок рекомбінації кількість вільних заряджених частинок у повітряному проміжку між пластинами зменшується.



Рис. 15.4. Схема рекомбінації (відновлення) молекул газу.

По-друге, позитивний йон, досягши негативного електрода (катода), «забирає» з нього електрон і перетворюється на нейтральну молекулу (атом). Аналогічно негативний йон, досягши позитивного електрода (анода), віддає йому зайвий електрон і теж перетворюється на нейтральну молекулу (атом). Нейтральні молекули (атоми) повертаються в газ, а вільні електрони притягуються до анода й поглинаються ним.

Якщо йонізатор «працює», у газі безперервно з'являються нові йони. Після припинення дії йонізатора кількість вільних заряджених частинок у газі швидко зменшується і газ перестає бути провідником електрики.

Зрозуміло, що збільшення напруги між пластинами, скоріш за все, спричинить збільшення розрядного струму, навіть якщо інтенсивність йонізатора не буде змінюватися. Графік залежності сили розрядного струму від різниці потенціалів (напруги) між електродами

за незмінних характеристик йонізатора — вольт-амперна характеристика газового розряду — наведений на рис. 15.5. На графіку можна виділити кілька характерних ділянок.

За відносно невеликої напруги (від 0 до U_1) між електродами залежність сили струму від напруги підпорядковується закону Ома, потім пропорційність порушується і починаючи з $U_{\text{нас}}$ сила струму не змінюється. Найбільшу силу струму, що є можливою внаслідок дії даного йонізатора, називають **струмом насиченості** $I_{\text{нас}}$. При струмі насиченості всі йони, що виникають в одиницю часу, долітають до електродів, не встигнувши рекомбінувати. Значення сили струму насиченості визначається властивостями йонізатора. Для збільшення $I_{\text{нас}}$ слід збільшити інтенсивність йонізації.

За досить великих напруг ($U > U_2$) кінетична енергія електрона зростає настільки, що внаслідок його співударяння з нейтральною молекулою газу від неї відщеплюється зовнішній електрон. Це явище називають **ударною йонізацією** молекул газу.

Електрони, що вивільнилися, прискорюються в електричному полі і в свою чергу йонізують нейтральні молекули газу, які стикаються з цими електронами. Число електронів і йонів у газі лавиноподібно зростає (рис. 15.6), а разом з ним зростає і розрядний струм. За ще більших значень напруги ударну йонізацію викликають і йони. Тепер до обох електродів рухаються лавини: до катода — позитивна йонна, до анода — електронна. Ці лавини зумовлюють **самостійну провідність газу**. Отже, при $U > U_2$ виникає **самостійний газовий розряд**, який може існувати без зовнішнього йонізатора. Генерація вільних носіїв заряду відбувається в цьому випадку за рахунок ударної йонізації.

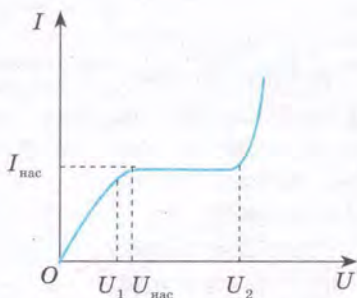


Рис. 15.5. Вольт-амперна характеристика газового розряду

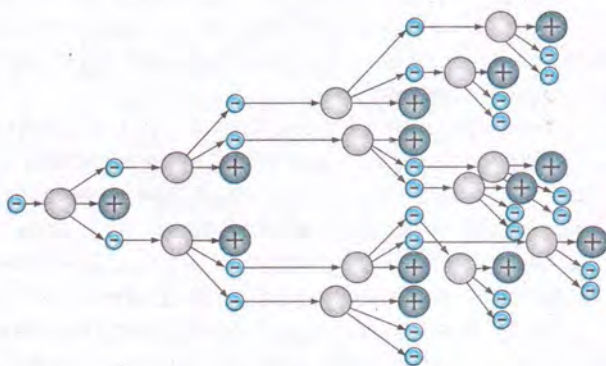


Рис. 15.6. Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, йонізує молекулу чи атом і звільняє ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два. До анода летять уже чотири електрони і т. д. Число вільних електронів збільшується лавиноподібно доти, доки вони не досягнуть анода

Слід, однак, зазначити, що для існування самостійного розряду необхідно, щоб у газі відбувалися й інші процеси, що спричиняють появу нових електронів замість тих, що «пішли» на анод. Такими процесами можуть бути вторинна емісія електронів з катода (вибиття електронів із катода позитивними йонами, які розганяються в електричному полі), йонізація йонами і внутрішня фотойонізація (випромінювання, яке супроводжує рекомбінацію йонів, може бути поглинене нейтральними атомами, у результаті чого деякі з них йонізуються).



3

Типи самостійних газових розрядів

Існує кілька типів самостійних газових розрядів, серед яких розрізняють іскровий, коронний, дуговий і тліючий.

Іскровий розряд має вигляд яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються. Прикладом грандіозного іскрового розряду в природі є блискавка.

Іскровий розряд триває всього кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується певними звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). Річ у тім, що температура газу, а отже, й тиск у каналі розряду різко підвищуються, в результаті повітря швидко розширюється і виникають звукові хвилі.

У техніці іскровий розряд використовують, наприклад, у свічках запалювання бензинових двигунів, для обробки поверхні особливо міцних металів.

Перед грозою або під час грози біля гострих виступів предметів іноді можна спостерігати слабе фіолетове світіння у вигляді корони, що охоплює вістря. Дослідження показують, що причиною цього явища є самостійний газовий розряд. Описаний вид газового розряду — **коронний розряд**.

На виникненні коронного розряду ґрунтується дія блискавковідводу. Блискавковідвід являє собою загострений металевий стрижень, з'єднаний товстим провідником із металевим предметом (див. рис. 15.7). Стрижень установлюють вище за найвищу точку будинку, який захищають, а металевий предмет закопують глибоко в землю (на рівні ґрунтових вод). Під час грози на кінці блискавковідводу виникає коронний розряд. У результаті заряд не накопичується на будинку, а стікає з вістря блискавковідводу.

Якщо приєднати два вугільні електроди до полюсів електричної батареї та з'єднати електроди один з одним, а потім трохи розсунути, то між кінчиками електродів можна спостерігати яскраве дугоподібне полум'я — **дуговий розряд** (електричну дугу).

Висока температура йонізованого газу у випадку дугового розряду, а також випромінювання світла, що супроводжує такий розряд,

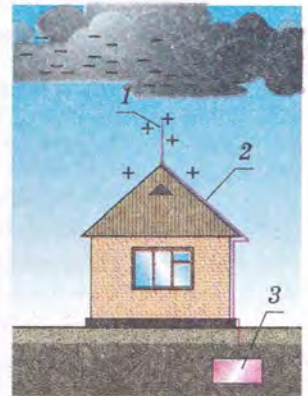


Рис. 15.7. Блискавковідвід (гromовідвід): 1 — загострений металевий стрижень; 2 — провідник — товстий з'єднувальний провід; 3 — металевий предмет, закопаний глибоко в землю

забезпечили широке застосування електричної дуги в науці, техніці, промисловості. Електрична дуга «працює» як потужне джерело світла в прожекторах. У металургії широко застосовують електропечі, в яких використовують дуговий розряд; жаром електричної дуги зварюють метали тощо.

За низького тиску, що становить десятки й соті частки міліметра ртутного стовпа, можна спостерігати світіння розрідженого газу — **тліючий розряд**. За такого низького тиску відстань між молекулами достатня для того, щоб навіть у слабкому електричному полі електрон устиг набрати досить велику швидкість, а отже, набути енергії, достатньої для ударної йонізації.

Тліючий розряд використовують у рекламних трубках, лампах денного світла (люмінесцентних трубках), у квантових джерелах світла — газових лазерах.

Останнім часом поширені телевізори з плазмовими екранами (екранами, функціонування яких ґрунтується на електричному розряді в газах).★

4

Що кожен старшокласник має знати про плазму

Плазма — це частково або повністю йонізований газ, у якому густини позитивних і негативних зарядів практично однакові.

Як правило, позитивно заряджені частинки — це йони, а негативно заряджені частинки — електрони. Тому в цілому плазма є *електрично нейтральною* системою.

Ступінь йонізації плазми (α) визначається відношенням числа йонізованих атомів до їх загального числа: $\alpha = \frac{N_i}{N}$. Залежно від ступеня йонізації плазма поділяється на *слабко йонізовану* (α становить частки відсотка), *частково йонізовану* (α — кілька відсотків) і *повністю йонізовану* ($\alpha = 100\%$).

Нагадаємо, що в стані плазми перебуває більша частина речовини Всесвіту — зорі, зоряні атмосфери, галактичні туманності й міжзоряне середовище; плазма заповнює магнітосферу Землі та йоносферу. Процесами в навколосемній плазмі зумовлені магнітні бурі та полярні сяйва. Відбиття радіохвиль від йоносферної плазми забезпечує можливість далекого радіозв'язку на Землі.

У різкій відмінності властивостей плазми від властивостей нейтральних газів визначальну роль відіграють два чинники.

По-перше, взаємодія частинок плазми характеризується кулонівськими силами притягання та відштовхування, які зменшуються з відстанню набагато повільніше, ніж сили взаємодії нейтральних частинок. Із цієї причини взаємодія частинок у плазмі є не парною, а колективною — одночасно взаємодіє велика кількість частинок.

По-друге, електричні та магнітні поля сильно діють на плазму, викликаючи появу в ній об'ємних зарядів і струмів та зумовлюючи

цілу низку специфічних властивостей плазми. Ці відмінності дозволяють розглядати плазму як особливий, «четвертий», стан речовини.

Термін «плазма» був уведений у фізику на початку 1930-х рр., але особлива зацікавленість плазмою виникла після 1949 р., коли розпочалися роботи зі створення водневої бомби та керованих термоядерних пристроїв.

Високотемпературна плазма ($T \sim 10^8$ К) поки не має широкого застосування, але саме з такою плазмою із Дейтерію й Тритію, а також ізотопу Гелію ^3He пов'язана ідея створення керованого термоядерного синтезу.

Низькотемпературна плазма ($T \sim 10^3$ К) має застосування в газорозрядних джерелах світла й у газових лазерах, у пристроях перетворення теплової енергії на електричну. Були також розроблені магнітогідродинамічні генератори, в яких за допомогою плазми, що рухається, створюються значні електричні поля. Пристрої під назвою *плазмотрони*, що створюють струмені густої низькотемпературної плазми, широко застосовуються в різних галузях техніки. Зокрема, за їхньою допомогою ріжуть і зварюють метали, наносять покриття.

★ 5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Гідрогену? Енергія йонізації атома Гідрогену 13,5 В.

v — ?

Дано:

$$W_i = 13,5 \text{ В}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Аналіз фізичної проблеми. Для того щоб йонізувати атом Гідрогену, електрон повинен мати кінетичну енергію, що дорівнює енергії йонізації атома Гідрогену. Порівнявши відповідні вирази, знайдемо з отриманої рівності шукану величину.

Пошук математичної моделі, розв'язання. Кінетична енергія електрона визначається виразом $\frac{m_e v^2}{2} = W_k$, де m_e — маса електрона.

Оскільки $W_k = W_i$, то $\frac{m_e v^2}{2} = W_i$. Тоді $v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 13,5}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,2 \cdot 10^6, \quad v = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь: мінімально необхідна швидкість руху електрона для йонізації атома Гідрогену $v = 2,2 \cdot 10^6$ м/с. ★

! Підбиваємо підсумки

За звичайних умов газ практично не містить вільних заряджених частинок, тому не проводить електричного струму. Щоб газ почав проводити струм, його необхідно йонізувати. Йонізацією газу називають

процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів з електрично нейтральних атомів (молекул).

Електричний струм у газах являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом. Розряд у газі, що відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним газовим розрядом — він можливий завдяки йонізації електронним ударом та емісії електронів з катода.

Залежно від тиску й температури газу, способів його йонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири основні види самостійних газових розрядів: іскровий, коронний, дуговий, тліючий.

Плазма — це частково або повністю йонізований газ, у якому густини позитивних і негативних зарядів практично однакові. Як правило, позитивно заряджені частинки — це йони, а негативно заряджені частинки — електрони. Тому в цілому плазма є електрично нейтральною системою.

Контрольні запитання

1. Чому за звичайних умов газ не проводить електричного струму?
2. Який газ називають йонізованим?
3. Що таке йонізація?
4. Який розряд у газі називають самостійним? несамостійним?
5. Опишіть механізм ударної йонізації.
6. Перелічіть основні види самостійних газових розрядів.
7. Наведіть приклади іскрового газового розряду. За яких умов він виникає?
8. Що являє собою коронний розряд?
9. Які особливості дугового розряду забезпечили його широке застосування?
10. Де застосовують електричну дугу?
11. За яких умов виникає тліючий розряд? Де його використовують?
12. Що таке плазма? Які її основні властивості?

★ Вправа № 15

1. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Нітрогену, якщо енергія йонізації Нітрогену дорівнює 14,5 еВ?
2. Якою має бути температура T атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху атомів була достатньою для йонізації шляхом зіткнень? Енергія йонізації атомарного водню дорівнює 13,6 еВ.
3. Знайдіть силу струму насичення між пластинами конденсатора, якщо під дією йонізатора в кожному кубічному сантиметрі простору між пластинами конденсатора кожної секунди утворюється 108 пар йонів, кожен з яких несе один елементарний заряд. Відстань між пластинами конденсатора дорівнює 1 см, площа кожної пластини становить 100 см².
- 4*. У йонізаційній камері, відстань між плоскими електродами якої дорівнює 5 см, проходить струм насичення густиною 16 мкА/м². Визначте, скільки пар йонів утворюється в кожному кубічному сантиметрі камери щосекунди. ★