§ 7. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ



99 % речовини Всесвіту перебуває у стані *плазми*: у цьому стані — речовина в зорях і галактичних туманностях, плазмою заповнений міжзоряний простір. На Землі ми теж часто маємо справу з плазмою: газ перебуває у стані плазми і в каналі блискавки, і в язиках полум'я, і всередині рекламних трубок; процесами в навколоземній плазмі зумовлені магнітні бурі, полярні сяйва...

Плазма — *це частково або повністю йонізований газ, у якому концентрації позитивних і негативних зарядів майже однакові.*

Про те, як йонізувати газ (створити плазму) і які процеси відбуваються, якщо йонізований газ помістити в електричне поле, згадаємо в цьому параграфі.

1 За яких умов гази стають провідниками

На відміну від металів та електролітів гази складаються з електрично нейтральних атомів та молекул і за звичайних умов майже не містять

---

* Зрозуміло, що в цьому та аналогічних завданнях таблиці, креслення тощо слід перенести в зошит.

вільних носіїв струму, тобто є діелектриками. А от якщо якось змусити електрон залишити атом, то в газі утворяться *позитивні йони і вільні електрони*; деякі електрони, у свою чергу, можуть приєднатися до нейтральних молекул і атомів — утворяться *негативні йони* (рис. 7.1).

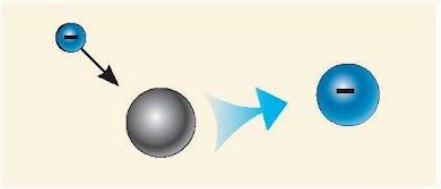


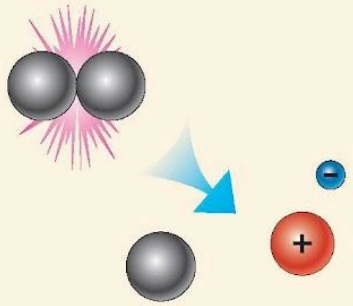
Рис. 7.1. Схема утворення негативних йонів у газах

Процес утворення в газі позитивних і негативних йонів та вільних електронів із нейтральних молекул і атомів називають **йонізацією**.

Щоб змусити електрон залишити атом, необхідно надати йому певну мінімальну енергію — *енергію йонізації* (W_i), яка залежить від хімічної природи газу. Залежно від того, звідки береться ця енергія, розрізняють кілька видів йонізації (див., наприклад, рис. 7.2).

Якщо йонізований газ помістити в електричне поле, то позитивні йони рухатимуться в напрямку силових ліній поля, негативні йони та електрони — в протилежному напрямку (рис. 7.3). У газі виникне *електричний струм*.

Термічна йонізація: енергія, необхідна для йонізації, виділяється під час непружного зіткнення молекул, які за високої температури газу мають велику швидкість.



Йонізація випромінюванням: енергію, необхідну для йонізації, постачає в атом високочастотне електромагнітне випромінювання.

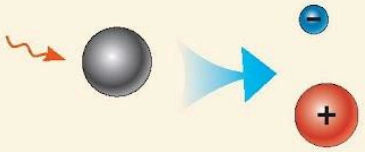


Рис. 7.2. Деякі види йонізації газів

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

2 Самостійний і несамостійний газові розряди

Досліди показують: якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (прибрати пальник, вимкнути джерело випромінювання), то зазвичай газовий розряд припиняється. Це пояснюється кількома причинами.

1. Електрон і позитивний йон можуть об'єднатися, перетворившись на нейтральну молекулу (атом). Цей процес називають *рекомбінацією*.

2. Вільні електрони поглинаються анодом.

3. Вільні йони біля електродів перетворюються на нейтральні частинки: негативні йони «віддають» «зайві» електрони аноду, а позитивні йони «забирають» електрони, яких їм «бракує», у катода. Після цього нейтральні частинки (молекули й атоми) повертаються в газ.

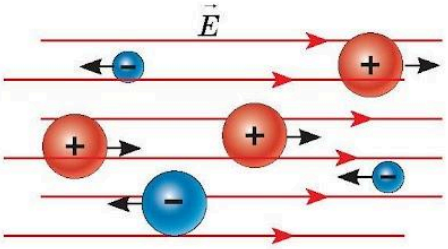


Рис. 7.3. В йонізованому газі за наявності електричного поля виникає напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм

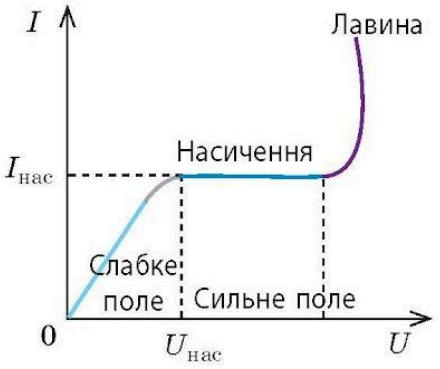


Рис. 7.4. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) газового розряду

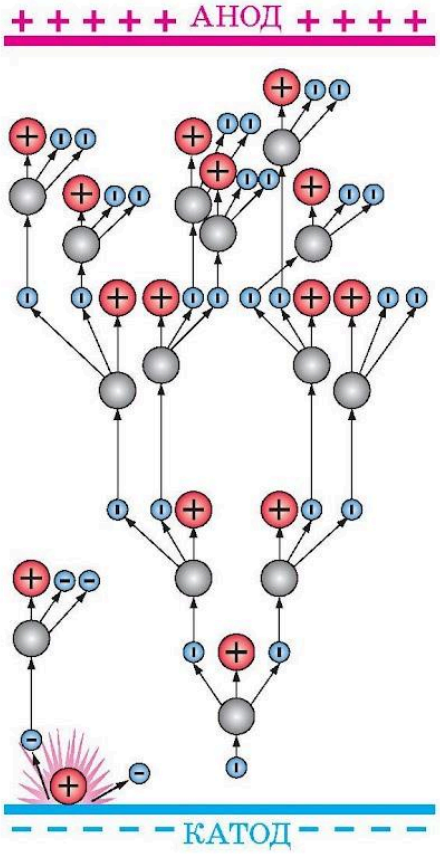


Рис. 7.5. Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, зіштовхується з атомом (молекулою) і «вибиває» ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два, і т. д.

Газовий розряд, який відбувається тільки під час дії зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**.

Здавалося б, що збільшення напруги між пластинами обов'язково приведе до збільшення сили струму, навіть якщо інтенсивність йонізатора не змінюється. Але це не завжди так. Графік залежності сили розрядного струму від напруги між електродами за незмінних характеристик йонізатора наведений на рис. 7.4. На графіку можна виділити кілька характерних ділянок.

Ділянка 1 (на графіку виділено блакитним). Залежність сили струму від напруги підкорюється закону Ома.

Ділянка 2 (виділено синім). Напруга збільшується, а сила струму залишається незмінною. Річ у тім, що в сильному електричному полі всі заряджені частинки, які створює йонізатор, долітають до електродів. *Найбільшу силу струму, що є можливою внаслідок дії даного йонізатора, називають* **струмом насичення**.

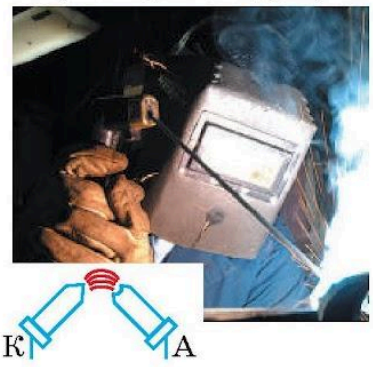
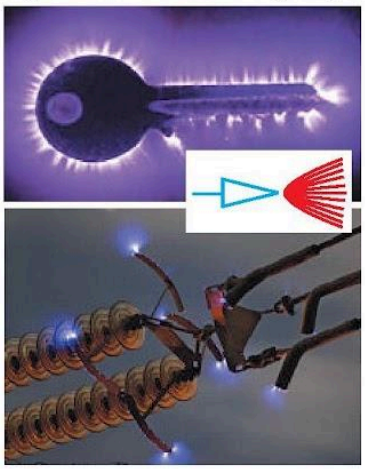
Ділянка 3 (виділено фіолетовим). Сила струму різко зростає за незначного збільшення напруги. З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що це відбувається завдяки **йонізації газу електронним ударом**, унаслідок чого кількість вільних заряджених частинок лавиноподібно збільшується (рис. 7.5).

Електрони, що утворилися під час ударної йонізації, прямують до анода і врешті-решт поглинаються ним. Проте газовий розряд може й не припинитися, навіть якщо прибрати йонізатор. Одним із джерел нових електронів є поверхня катода: позитивні йони «бомбардують» катод і вибивають із нього електрони — відбувається *емісія (випромінювання) електронів* з поверхні катода.

Газовий розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.

Залежно від тиску та температури газу, конфігурації електродів і напруги між ними розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: *іскровий, тліючий, дуговий, коронний*.

Види самостійних газових розрядів

Іскровий газовий розряд  	*Виникає* за атмосферного тиску та великої напруги між електродами. Має вигляд яскравих зигзагоподібних смуг, що розгалужуються, триває лише кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). *Використовують* у запальних свічках бензинових двигунів, для обробки особливо міцних металів, для запобігання перенапрузі ліній електропередачі (іскрові розрядники). Приклад грандіозного іскрового розряду в природі — блискавка.
Тліючий газовий розряд  	*Виникає* за невеликої напруги між електродами і низького тиску (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа): за зазначеного тиску відстань між молекулами є такою, що навіть у слабкому електричному полі електрони розганяються до такої швидкості, що набувають енергії, достатньої для ударної йонізації. *Використовують* у лампах денного світла (люмінесцентних трубках), кольорових газорозрядних трубках (колір світіння визначається природою газу). Найважливіша галузь застосування — квантові генератори світла (газові лазери).
Дуговий газовий розряд (електрична дуга) 	*Виникає* за високої температури (понад 4000 °С) і майже за будь-якого тиску. Являє собою яскраве дугоподібне полум'я. За такої високої температури з поверхні катода безперервно «випаровуються» електрони, а в стовпі розпеченого газу відбувається термічна йонізація. Висока температура катода й анода підтримується бомбардуванням електродів позитивними і негативними йонами та електронами, прискореними електричним полем. *Використовують* у металургії (електропечі, зварювання жаром електричної дуги металів), як потужне джерело світла в прожекторах тощо.
Коронний газовий розряд 	*Виникає* за тиску порядку атмосферного в сильному ($E > 500$ кВ/м), різко неоднорідному електричному полі. Такі поля формуються поблизу електродів із великою кривизною поверхні (вістря, тонкий дріт тощо). Являє собою слабке фіолетове світіння у вигляді корони (пучків, пензликів). *Використовують* для очищення газів (електрофільтри), в лічильниках елементарних частинок (лічильники Гейгера — Мюллера); на виникненні цього розряду ґрунтується дія блискавковідводу. У природі зазвичай спостерігається перед грозою або під час грози на гострих кінцях високих предметів (веж, щогл, вершин скал тощо); має ще одну назву — «вогні святого Ельма».

Зверніть увагу! Електрон, зіштовхнувшись з атомом, не завжди вибиває з нього електрон — також він може передати електронній оболонці атома частину своєї енергії. Атом збуджується, тобто його електронна оболонка переходить у стан із більшим рівнем енергії. Проте у збудженому стані атом перебуває дуже короткий час (кілька наносекунд) — майже миттєво він повертається в основний стан, випромінюючи надлишкову енергію у вигляді певної «порції» (кванта) світла. Оскільки під час газового розряду збуджується величезна кількість атомів, *газовий розряд зазвичай супроводжується світінням.*

3 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Гідрогену? Енергія йонізації атома Гідрогену дорівнює 13,6 еВ (*електрон-вольт* — позасистемна одиниця енергії: 1 еВ$=1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж).

Аналіз фізичної проблеми. Щоб йонізувати атом Гідрогену, електрон повинен мати кінетичну енергію не меншу, ніж енергія йонізації цього атома. Найменшу швидкість електрона знайдемо, користуючись рівністю $E_k = W_i$.

Дано:
$W_i = 13{,}6$ еВ $=$
$13{,}6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж$=$
$=21{,}8\cdot10^{-19}$ Дж
$m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг

υ — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання.

За означенням кінетичної енергії: $E_k = \dfrac{m_e\upsilon^2}{2}$, де m_e — маса електрона. Оскільки $E_k = W_i$, то $\dfrac{m_e\upsilon^2}{2} = W_i \Rightarrow \upsilon = \sqrt{\dfrac{2W_i}{m_e}}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\upsilon] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{м}}{\text{с}^2\cdot\text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};\ \upsilon = \sqrt{\frac{2\cdot21{,}8\cdot10^{-19}}{9{,}1\cdot10^{-31}}} \approx 2{,}2\cdot10^6\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).$$

Відповідь: $\upsilon \approx 2{,}2\cdot10^6$ м/с.



Підбиваємо підсумки

- Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із електрично нейтральних атомів (молекул) газу називають йонізацією.
- Електричний струм у газах (газовий розряд) — напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів, які утворюються в газі внаслідок йонізації.
- Газовий розряд, який відбувається тільки під час дії зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом; розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним газовим розрядом.
- Залежно від тиску й температури газу, способу його йонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: іскровий, коронний, дуговий, тліючий.



Контрольні запитання

1. Що таке плазма? **2.** Чому за звичайних умов газ не проводить електричний струм? **3.** Що таке йонізація? Які існують види йонізації? **4.** Який розряд у газі називають самостійним? несамостійним? **5.** Опишіть механізм ударної йонізації. **6.** Опишіть основні види самостійних газових розрядів: за яких умов вони виникають; який мають вигляд; де їх застосовують.

Вправа № 7

1. Який вид газового розряду описував римський філософ і поет *Луцій Анней Сенека* (4 р. до н. е. — 65 р.), говорячи, що перед грозою «зорі ніби сходять з неба і сідають на щогли кораблів»?
2. 5 листопада 1953 р. у Києві відкрили рух по мосту Патона — першому у світі суцільнозварному мосту (названий на честь видатного українського радянського вченого *Євгена Оскаровича Патона* (1870–1953), під керівництвом якого й був споруджений міст). Технологію застосування якого газового розряду досліджував і впроваджував Є. О. Патон?
3. Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Нітрогену? Енергія йонізації атома Нітрогену — 14,5 еВ.
4. Якою має бути температура атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху його атомів була достатньою для йонізації шляхом зіткнень? Енергія йонізації атома Гідрогену — 13,6 еВ.
5. Об'єднавшись у невеликі групи, підготуйте короткі презентації або повідомлення про застосування та прояви в природі самостійних газових розрядів.

Фізика в цифрах

Деякі характеристики блискавки

- Напруга — 10–100 МВ; сила струму — 20–300 кА.
- Тривалість першого імпульсу струму — близько 80 мкс.
- Температура в каналі — близько 10 000 °С.
- Діаметр внутрішнього каналу — до 0,4 м.



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