

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ФІЗИКА.

ІОНІЗАЦІЯ ГАЗІВ. РОЗРЯД В ГАЗАХ

для студентів галузей знань:

- 10 Природничі науки
- 12 Інформаційні технології
- 13 Механічна інженерія
- 14 Електрична інженерія
- 15 Автоматизація та приладобудування
- 17 Електроніка та телекомунікації
- 18 Виробництво та технології
- 19 Архітектура та будівництво
- 27 Транспорт

Дніпро

НГУ

2016

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»



ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА

Кафедра фізики

Л.І. Барташевська, А.С. Зайцев

ФІЗИКА.

ІОНІЗАЦІЯ ГАЗІВ. РОЗРЯД В ГАЗАХ

для студентів галузей знань:

- 10 Природничі науки
- 12 Інформаційні технології
- 13 Механічна інженерія
- 14 Електрична інженерія
- 15 Автоматизація та приладобудування
- 17 Електроніка та телекомунікації
- 18 Виробництво та технології
- 19 Архітектура та будівництво
- 27 Транспорт

Дніпро

НГУ

2016

Фізика. Іонізація газів. Розряд газів. Методичні вказівки для студентів усіх спеціальностей./ Л.І.Барташевська, А.С. Зайцев. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2016. – 8 с.

Автори:

Л.І.Барташевська, А.С. Зайцев., кандидати фіз.-мат. наук.

Затверджено до видання редакційною радою Державного ВНЗ «НГУ» протокол № 3 від 3.03.2016 р. за поданням методичної комісії за напрямком 184 Гірництво (протокол №1 від 15.01.2016 р.).

Методичні матеріали призначені для самостійної підготовки студентів усіх інженерних спеціальностей до розділу «Електрика та магнетизм».

Розглянуто механізми іонізації газів, умови виникнення та види самостійних розрядів, деякі використання розрядів.

Рекомендації орієнтовано на активацію навчальної діяльності студентів.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри фізики канд. фіз.-мат. наук, проф. І.П. Гаркуша.

Метою цієї роботи є розгляд процесів, при яких в газах, що за нормальних умов є ізоляторами, може протікати струм, а також опис деяких видів розрядів і можливості їх застосування.

Газ складається з електрично нейтральних атомів і молекул. За нормальних умов газ - ізолятор. Але, якщо газ іонізувати, тобто перетворити електрично нейтральні частки - атоми, молекули в позитивні іони і електрони, то в газі з'являться носії зарядів (рис. 1а). Іон - електрично заряджена частка, що утворюється при відриві або приєднанні одного або декількох електронів до атома, молекули. В деяких випадках атоми і молекули можуть приєднувати електрони, утворюючи негативні іони (рис. 1б). Після іонізації газ стає провідником електричного струму. Електричним струмом називається впорядкований рух електричних зарядів. У металах носії зарядів - електрони, в рідинах (електролітах), що проводять, - іони.

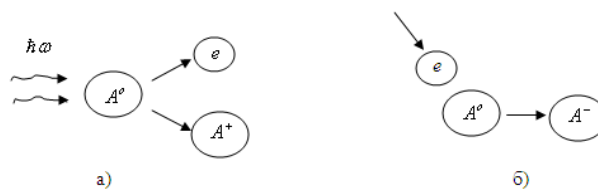


Рис. 1

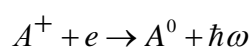
A^+ , A^- - позитивний і негативний іони, A^0 - нейтральний атом, e - електрон, $h\omega$ - квант енергії.

Процес проходження струму через газ, що супроводжується сукупністю електричних і теплових явищ, називається електричним розрядом. Залежно від того, за рахунок яких чинників в газі утворюються заряджені частки, необхідні для існування розряду, розрізняють несамостійний і самостійний розряди. Для підтримки несамостійного розряду потрібне поповнення зарядів за рахунок зовнішніх дій - іонізаторів. Іонізаторами можуть бути потоки електронів, протонів, α -частинок, рентгенівське або ультрафіолетове випромінювання. Іонізація атомів і молекул газу відбувається також в електричних полях великої напруженості і при сильному нагріві газу.

Кількісною характеристикою дії іонізатора служить швидкість іонізації q , вимірювана числом пар протилежних по знаку заряджених часток, що виникають в одиниці об'єму газу за одиницю часу.

При діючому іонізаторі число заряджених часток в газі не може збільшуватися нескінченно. Паралельно йде процес їх зникнення - рекомбінація. Позитивні іони і електрони, зустрічаючись, утворюють нейтральні молекули і атоми.

На іонізацію атома (молекули) витрачається енергія, тому позитивний іон і електрон мають після іонізації енергію в сумі більшу, ніж атом (молекула). Процес рекомбінації протікає за схемою



і супроводжується електромагнітним випромінюванням.

Залежно від того, який з процесів: іонізація або рекомбінація переважає, спостерігається або збільшення кількості заряджених часток, або їх зменшення. Якщо

швидкість іонізації q , а внаслідок рекомбінації зникатиме в одиниці об'єму за одиницю часу αn^2 пар заряджених часток, то рівняння балансу заряджених часток можна записати так:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 \quad (1)$$

де n - концентрація пар заряджених часток, α - коефіцієнт рекомбінації, залежний від природи газу.

В стані динамічної рівноваги $\frac{dn}{dt} = 0$, $n = \text{const}$, а $q = \alpha n^2$. Отже, рівноважна концентрація n_0 пар заряджених часток $n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}$.

Оцінимо рівноважну концентрацію пар іонів в повітрі за нормальних умов. Сумарна потужність природних іонізаторів (радіоактивне випромінювання речовин, що знаходяться на поверхні Землі і космічне випромінювання, проникаюче в земну атмосферу) $q = 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, коефіцієнт рекомбінації повітря $\alpha = 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Тоді $n = 10^9 \text{ м}^{-3}$. Це нікчемна доля концентрації молекул повітря, яка за нормальних умов дорівнює $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Для кількісного вивчення розряду розглянемо експериментальну залежність струму розряду від напруги.

Простий пристрій для отримання залежності $I = f(U)$ показаний на рис. 2.

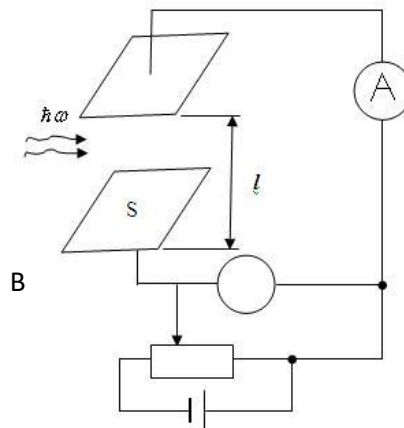


Рис. 2

Об'єм $V = l \cdot S$ заповнений повітрям за нормальних умов. Число пар іонів за цих умов дуже мале, тому виміри краще проводити з штучним іонізатором. Можна, наприклад, опромінювати простір між пластинами ультрафіолетовим світлом.

Підвищуючи напругу на пластинах від нуля, отримаємо вольтамперну характеристику (рис. 3).

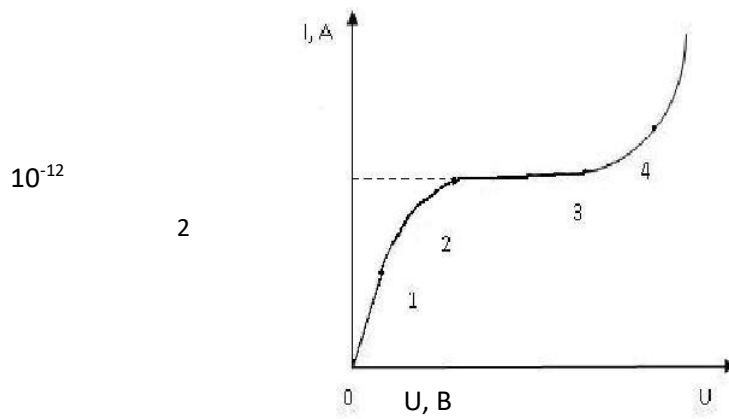


Рис. 3

На ділянці 0-1 дуже слабкий струм практично лінійно росте з напругою, тобто виконується закон Ома. Струм на цій ділянці можна виразити формулою

$$I = e \cdot n(b^+ + b^-)S \cdot E,$$

де e - елементарний заряд, n - концентрація пар заряджених часток, b^+ , b^- - рухливості іонів і електронів, E - напруженість електричного поля.

На ділянці 1-2 закон Ома порушується, а залежність струму від напруги стає складною. Задавши напруженість електричного струму в розрядному проміжку 1 В/м, а значення усередненої (по іонах і електронах) рухливості заряджених часток $b^+ = b^- = b = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$, площу пластини $S = 10^{-2} \text{ м}^2$, концентрацію внаслідок дії іонізації 10^{12} м^{-3} , можна отримати силу струму в початковій частині розряду (коли діє закон Ома), $I = 10^{-13} \text{ А}$

Подальше збільшення напруги (після точки 2) не призводить до збільшення струму. Це відбувається тому, що з розрядного проміжку пари заряджених часток зникають не лише за рахунок рекомбінації, але і за рахунок віднесення їх з розрядного проміжку струмом. При постійній потужності зовнішнього іонізатора умова динамічної рівноваги тепер буде такою

$$\frac{d}{dt}(nSl) = qSl - \alpha n^2 Sl - \frac{jS}{e}$$

Оскільки $S \neq 0$; $e \neq 0$, то після ділення на Se лівої і правої частини цього рівняння отримаємо:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 - \frac{j}{el} \quad (2)$$

Електрони і іони прискорюються до таких швидкостей, що устигають прийти до пластин раніше, ніж відбувається їх рекомбінація. Тому можна вважати, що $\frac{j}{el} \gg \alpha n^2$.

Тоді умові рівноваги відповідатиме вираження

$$\frac{dn}{dt} = q - \frac{j}{el} = 0.$$

Струм розряду I дорівнює:

$$I = qelS = qeV.$$

Він не залежить від напруги на розрядному проміжку і називається струмом насичення. Залежить струм насичення від потужності іонізатора (будучи тому мірою

іонізуючої дії іонізатора) і об'єму іонізованого газу. На вольтамперній характеристиці відповідає ділянці 2-3. Якщо узяти $l=10^{-6}$ м, $q=10^{10}$ м⁻³, то $I_{нас.}=10^{-10}$ А.

Він більше на два порядки, чим початковий струм, але все ще дуже малий.

Збільшення напруги (ділянка 3-4) призводить до збільшення струму. На цій ділянці проявляється новий, внутрішній іонізатор - швидкі електрони. З'являються вони внаслідок прискорення їх електричним полем. Прискорюючись, електрони набувають енергію, достатню для іонізації молекул електронним ударом. Виникає пара зарядів : позитивний іон і електрон (рис. 4).

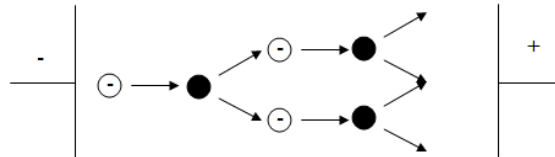


Рис. 4

Продовжуючи рухатися в полі, електрони, що з'явилися, знову набувають енергію, достатню для іонізації. Число електронів зростає до чотирьох. Такий режим наростання числа носіїв називається лавинним. Лавина електронів йде на позитивний електрод, утворюючи електронну складову струму. Проте, зовнішній іонізатор для існування розряду залишається необхідним. Якщо прибрати зовнішній іонізатор, розряд продовжиться тільки до тих пір, поки усі електрони не досягнуть позитивно зарядженого електроду (анода). Розряд, викликаний дією зовнішнього іонізатора, називається несамостійним газовим розрядом.

Несамостійний розряд перейде в самостійний тоді, коли концентрація зарядів збільшуватиметься в результаті процесів, що протікають усередині розряду. Такими процесами можуть бути: 1) іонізація позитивними іонами; 2) іонно-електронна емісія з катода; 3) фотоіонізація і так далі

Після виникнення в розрядному проміжку безперервно наростаючої лавини електронів, настає момент, коли позитивні іони на довжині вільного пробігу набувають енергію, достатню для іонізації молекул. Одностороння лавина замінюється двосторонній. При рекомбінації великого числа іонів звільняється енергія - виникає електромагнітне випромінювання. Воно складається з фотонів, енергія яких ε дорівнює $\hbar\omega$ (\hbar - постійна Планка, ω - циклічна частота). Молекула поглинає фотон, його енергія йде або на збудження молекули, або на її іонізацію, яку називають фотоіонізацією.

В результаті дії внутрішніх іонізаторів струм стрибкоподібно збільшується на декілька порядків, і в досліджуваному об'ємі запалюється самостійний розряд. Напруга на електродах розрядного проміжку у цей момент називається напругою пробою газу U_{np} . Якщо це напругу прикласти до пластин стрибком, то запалення розряду відбуватиметься без попереднього розвитку несамостійного розряду. Напруга пробою за законом Пашена залежить від твору тиску газу p на довжину l розрядного проміжку:

$$U_{np} = f(pl)$$

Цей закон виконується тим точніше, чим менше p і l .

Залежно від процесів утворення іонів в газі, форми електродів, тиску газу розрізняють такі типи самостійних розрядів : тліючий, іскровий, дуговий, коронний. Характер розряду залежить від хімічної природи газу, температури, тиску газу, від

розташування, форми, матеріалу електродів, від напруженості електричного поля. Тому розряд придбаває різноманітні форми, супроводжується випромінюванням електромагнітних хвиль (світла), звуковими ефектами - тріском, шурхотом, громом.

Вивчення різних форм самостійного розряду ускладнене із-за великої кількості різних елементарних процесів, що протікають в них. Тому опис самостійного розряду заснований на експериментальному дослідженні відповідних вольтамперних характеристик $I_p = f(U)$.

Самостійний розряд отримати в розрідженому газі набагато легше, ніж при атмосферному тиску. Це пояснюється тим, що при низьких тисках довжина вільного пробігу іонів і електронів збільшується, і навіть в слабких полях вони придбавають достатню енергію для іонізації атомів і молекул.

Опишемо тліючий розряд в повітрі, спостерігаючи його виникнення в скляній трубці завдовжки 40÷50 см. На електроди, впаяні в торці трубки, подають напругу в декілька сотень вольт. При атмосферному тиску прикладеної напруги недостатньо для запалення розряду. Тому тиск в трубці знижують приблизно до 100 мм рт.ст., спостерігаючи виникнення розряду у вигляді шнура, що світиться. Подальше зменшення тиску призводить до розширення шнура і заповнення розрядом усього простору між анодом і катодом.

Для отримання вольтамперної характеристики розряду збирають електричний ланцюг, зображений на рис. 5. Для стійкості розряду послідовно з розрядним проміжком включений баластний опір R, на якому із зростанням струму росте падіння напруги. Вольтамперна характеристика самостійного розряду показана на рис. 6.

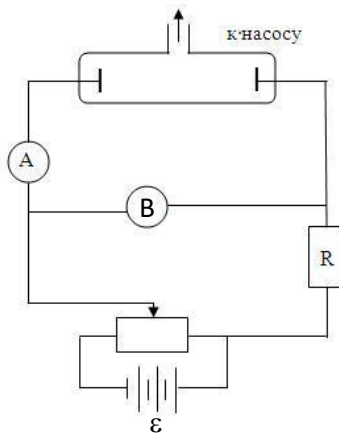


Рис. 5

Перша форма самостійного розряду (їй відповідає ділянка 4-5) називається темним розрядом. Свічення газу ще дуже слабке.

Наступна форма розряду називається тліючим розрядом (ділянка 6-7-8). Виникає при тисках близько 40÷50 мм рт.ст. Розряд на ділянці 7-8 носить назву аномального.

Починаючи із струму, відповідного точці 8, катод розігрівається і стає помітною термоелектронна емісія з поверхні катода. Кількість електронів сильно збільшується і розряд переходить у форму дугового (ділянка 9-10). Область 8-9 відповідає нестійкій формі розряду.

Для дугової форми розряду характерні великі струми і малі падіння напруги на розряді. Вольтамперна характеристика дуги - падає: із збільшенням струму напруга на

дузі зменшується (рис. 6). Тому для регулювання струму і необхідно включати баластний опір R.

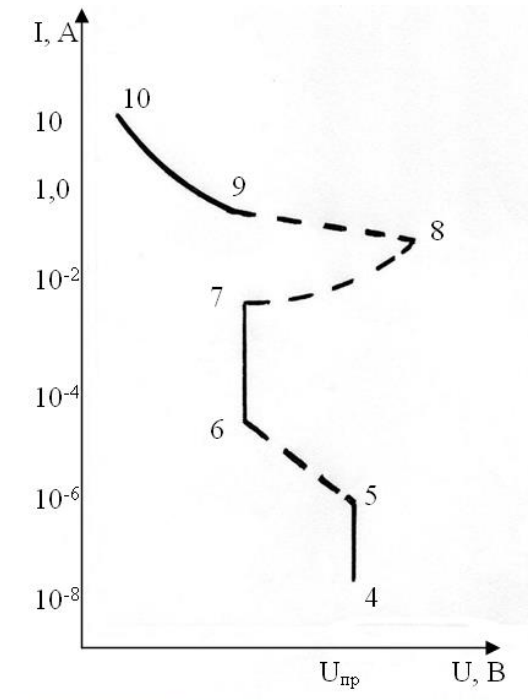


Рис. 6.

Дуги виникають як при низьких (міліметри рт.ст.), так і при високих тисках. Розрізняють три види дугових розрядів : термоелектронні, газотронні і автоелектронні.

У термоелектронних дуг катод виготовляють з тугоплавких матеріалів. Типовим представником цього типу дугового розряду є дуга Петрова з графітовими електродами. Дуга Петрова горить при атмосферному тиску. При роботі на постійному струмі температура катода досягає 3000 C , а анода - до 4000 C . Графітові електроди згорають не однакою швидко. Катод згорає в два рази повільніше за анод, при цьому загострюється, а на аноді утворюється поглиблення, зване кратером.

Якщо катод виготовляється з тугоплавких металів (вольфраму, молібдену), то дуга може горіти при зниженому тиску. Дуга Петрова горить і на змінному струму. Для отримання газотронних дуг використовують катода непрямого нагріву. Робочий тиск для таких дуг близько $10^{-2} \div 10^{-3}$ мм рт.ст.).

У автоелектронних дуг катода виготовляють з легкоплавких матеріалів (мідь, ртуть).

Застосування газових розрядів.

У поширених джерел світла - ламп розжарювання є основний недолік - низький коефіцієнт корисної дії (близько 4%). Це привело до створення економічніших джерел світла - газорозрядних.

У газорозрядних джерел світла "робочим тілом" на відміну від розжареної нитки напруження служить плазма різних типів газових розрядів. Плазма - частково або повністю іонізований газ, в якому густина позитивних і негативних зарядів практично однакова.

Газорозрядні джерела світла діляться на газосвітні і люмінесцентні. У перших джерелом світла являється плазма тліючого розряду, у других - люмінофор, що збуджується випромінюванням плазми розряду.

Газосвітні лампи виконані із скляної трубки, заповненої газом. У середині трубки, на її торцях розташовані електроди. Під дією електричного поля, створеного в трубці, електрони, прискорені полем, викликають збудження атомів газу. Збуджені атоми, переходячи в основний стан, випромінюють фотони (світло). Спектр випромінювання залежить від газу-наповнювача. Неон дає оранжево-червоне світло, аргон - синє, гелій - жовте. Можливість надавати трубкам форми букв, знаків, малюнків, цифр дозволяє використовувати їх в рекламному, декоративному освітленні, сигналізації.

Люмінесцентні джерела світла використовують для освітлення приміщень. Такі джерела дають спектр випромінювання близький до денного. У основі принципу дії таких ламп лежить ідея С. І. Вавилова - перетворення ультрафіолетового випромінювання газосвітних ламп на денне світло за допомогою люмінесценції. Для цього на внутрішню поверхню трубок газосвітних ламп наносять шар спеціально підібраного люмінофора. Його призначення - перетворити ультрафіолетове випромінювання плазми розряду в штучне денне світло. Для посилення випромінювання плазми в ультрафіолетовій частині спектру в лампу вводять невелику кількість ртуті (у сучасних енергозощадних лампах близько 4 міліграма).

Ультрафіолетове випромінювання використовують в медицині для знезараження приміщень і медичних інструментів. Відповідні лампи називаються бактерицидними.

У потужних лампах денного світла використовують дугові розряди в парах ртуті при високих тисках. Люмінофор підбирають так, щоб він добре поглинав ультрафіолетове випромінювання і перетворював його на оранжево-червоне, якого практично немає в спектрі дугового розряду. Такі лампи називають скорочено ДРЛ (дугова, ртутна, люмінесцентна).

Широко використовуються також водневі, натрієві лампи. Випромінювання водневої лампи створюється атомами і молекулам водню, збудженими при розряді в газі. Натрієві лампи дають інтенсивне випромінювання в жовтій області спектру. Використовують для освітлення вулиць, площ.

Плазма газових розрядів використовується як активне середовище оптичних квантових генераторів (лазерів). Лазери - якісно нові джерела світла. Особливості газових лазерів пов'язані з вибором робочого газу або суміші газів і способу створення інверсного стану. У більшості газових лазерів інверсний стан створюється при виникненні розряду в газі, тому такі лазери назвали газорозрядними.

У гелій-неоновому лазері активним середовищем є розряд в суміші гелію і неону, узятих відносно 10:1 при загальному тиску $p=1$ мм рт.ст.

У лазері на вуглекислому газі активним середовищем є розряд в суміші вуглекислого газу, азоту, гелію. "Робочою" ж речовиною є вуглекислий газ. Він відповідальний за генерацію лазерного випромінювання.

При горінні дугового розряду випромінювання світла інтенсивне. Але оскільки 85% випромінювання приходить на анод, 10% на катод, а інші 15% на саму дугу, то вона не може бути віднесена до газорозрядних джерел світла. Проте, дуговий розряд має широке застосування в техніці. Потужне випромінювання кратера дуги використовують в прожекторах проєкційних кіноапаратів.

Окрім цього потужний дуговий розряд використовують в плазмотронах. Плазмотрон - пристрій для створення щільної низькотемпературної плазми за допомогою електричних розрядів в газах. У тому, що працює плазмотроні газ (повітря, аргон, азот, водень) безперервно продувають через область, де горить дуга. Газ іонізується і

перетворюється на плазму, що витікає з області розряду у вигляді струменя. За допомогою плазмотронів виробляється плазмове нанесення покриттів, плазмове різання, зварювання.

У плазмохімії плазмотрони використовують для отримання ультрадисперсних порошків, плівок органічних і неорганічних матеріалів, для травлення, модифікації поверхонь виробів.

Коронний розряд - не повністю розвинутий іскровий розряд. Спостерігається в сильно неоднорідному електричному полі у загострених кінців металевих провідників. Другий електрод, практично довільної форми має бути розташований досить далеко, щоб не розвинувся іскровий розряд. Це приклад тліючого розряду при атмосферному тиску.

Іскровий розряд - нестійкий самостійний розряд, що має вигляд тонкого зігнутого каналу з множиною розгалужень. Виникає зазвичай при тисках газу порядку атмосферного в електричному полі, близькому до однорідного, між двома електродами. Для повітря за нормальних умов значення напруженості поля, необхідне для пробую $E_{пр} \approx 3 \cdot 10^6$ В/м.

Прикладом іскрового розряду є блискавка. Сила струму в блискавці від 10 до 10^3 кА. Напруга між хмарою і Землею перед виникненням блискавки близько $10^8 \div 10^9$ В. Тривалість одного розряду $\tau \approx 10^{-6}$ с. Заряд, що переноситься блискавкою $q = 10^{-2}$ Кл \div 1 Кл.

В результаті проходження імпульсу струму через канал іскри (блискавки) виділяється велика енергія. Через це газ в іскровому проміжку нагрівається до високих температур (10^4 К), іонізується, а наступна рекомбінація призводить до свічення газу. Різка підвищення температури веде до підвищення тиску газу. Це фіксується на слух у вигляді потріскування в слабких розрядах і у вигляді грому, супроводжуючого розряди у вигляді блискавки.

Використовують газовий розряд для займання горючої суміші в двигунах внутрішнього згорання, електроіскрової обробки матеріалів, застосовують як запобіжники від перенапружень в електричних лініях, для реєстрації заряджених часток в іскрових камерах, виміри високої напруги.

Якісне пояснення механізму іскрового розряду дає стримерна теорія. Згідно з нею електронна лавина, що йде від катода, збуджує і іонізує атоми і молекули газу, які випускають кванти світла, що поширюються до анода із швидкістю світла. Ці кванти іонізують на своєму шляху молекули і атоми, викликаючи нову лавину електронів. У газі з'являються стримери - області іонізованого газу, що слабо світяться. З'єднуючись, стримери утворюють канали, по яких рухається лавина електронів. Наздоганяючи одна одну, лавини, зливаючись, утворюють канал іскрового розряду.

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т. 2 Електрика та магнетизм – К.: «Техніка», 2006. – 452 с.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.: Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. К.: «Либідь», 2001. – 448 с.
3. Трофімова Т.І. Курс фізики. – М., «Академия», 2005. – 560 с.

**Барташевська Людмила Іванівна
Зайцев Анатолій Семенович**

ФІЗИКА.

ІОНІЗАЦІЯ ГАЗІВ. РОЗРЯД В ГАЗАХ

для студентів усіх спеціальностей з дисципліни «Фізика»