

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроніки**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №2**

**БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**3 КУРСУ  
«ПЛАЗМОВА ТА ІМПУЛЬСНА ЕЛЕКТРОНІКА»  
Для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої»**

Київ 2012

**Мета роботи:** вивчити особливості та характеристики бар'єрного розряду.

### Короткі відомості про бар'єрний розряд

Під бар'єрним розрядом в даний час розуміють різновидність тихого розряду, який виникає в газі атмосферного тиску під дією прикладеної до електродів змінної або імпульсної напруги, при цьому хоча б один із двох електродів повинен бути покритий діелектриком. Сама назва "бар'єрний розряд" була запропонована в кінці 60-х років минулого століття Е.Н. Єр'омініним і є в даний час загальною призначеною.

Початком досліджень бар'єрного розряду необхідно вважати перше десятиліття минулого століття. Детальний аналіз перших результатів вивчення цього явища приведені в книзі О.Глокера та С.Лінда (Electrochemistry of Gases and other Dielectrics. Wiley. New York, 1939), а також і в більш пізніших оглядових статтях (Р.Ланта та Ю.В.Філіппова)

Цей тип розряду характеризується, з одного боку, високою середньою енергією електронів, а з другого – низькою температурою газу, яка близька до температури електродів. При цьому енергія, яка вкладається в розряд виділяється в короткоживучих малоінтенсивних іскрах – мікророзрядах. Сукупність усіх цих умов робить бар'єрний розряд ефективним для проведення різноманітних реакцій (конденсації, синтезу, полімеризації та ін.). Найбільш широке застосування бар'єрний розряд знайшов в установках та апаратах синтезу озону для медицини, екології, біології, технології нанесення різних покриттів.

На рис.1 схематично показані електродні системи, в яких при подачі змінної або імпульсної високої напруги (десятки кВ) збуджується бар'єрний розряд.

Незважаючи на простоту цих конструкцій, в яких один або обидва електроди контактують з діелектричними бар'єрами, в розрядній зоні проходять досить складні процеси пов'язані, як з електричними явищами, так і з фізико-хімічними параметрами розрядного середовища і діелектрика. В зв'язку з цим на даний час не існує повного теоретичного опису цього явища.

Найбільші успіхи в цьому були досягнуті при феноменологічному представленні бар'єрного розряду, як нелінійного об'єкту електричного ланцюга. [1]. В основі такого підходу лежить заміна бар'єрного розряду деякою еквівалентною схемою до складу якої входять стандартні електротехнічні елементи: конденсатори, опори, генератори і інші. Різними авторами були запропоновані різні еквівалентні схеми, підчас з великою кількістю елементів. Аналіз таких схем в тій, або іншій мірі підтверджували одержані експериментальні результати. Найбільш простою і наглядною еквівалентною схемою, яка дає можливість проаналізувати поведінку струму і напруги в бар'єрному розряді і відобразити представлення про його вольт-амперну характеристику є схема показана на рис. 2.

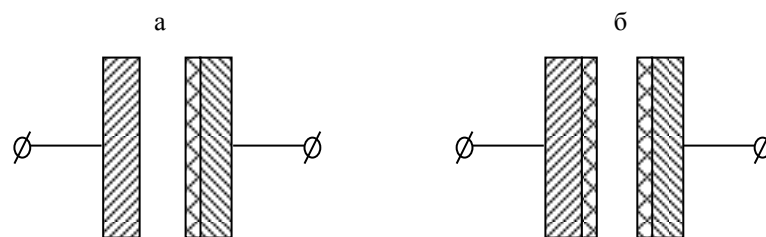


Рис.1. Схематична конструкція електродних систем з діелектричним бар'єром:

а – з одним бар'єром;

б – з двома бар'єрами.

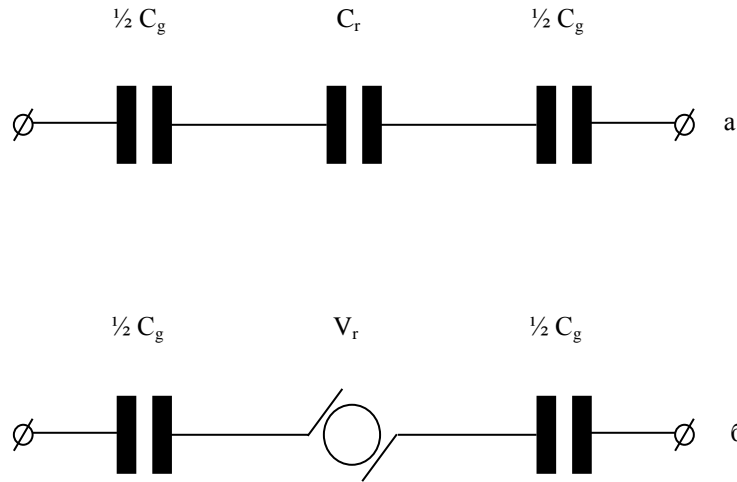


Рис.2. Еквівалентна схема електродної системи з діелектричним бар'єром:

- а – при відсутності розряду;
- б – при присутності розряду.

При живлення бар'єрного розряду синусоїдальною напругою найбільш зручно проводити аналіз електричних явищ. При необхідно виділити два періоди: перший – до досягнення напруги, яка відповідає напрузі виникнення розряду, другий – після виникнення розряду. В перший період струм через розряд визначається загальною ємністю електродної системи з діелектриком і розрядним проміжком, і в цьому випадку еквівалентна схема буде мати вигляд трьох послідовно з'єднаних конденсаторів, а при одному бар'єрі – двох конденсаторів з ємностями  $C_g$  і  $C_r$  (рис. 2а).

Після виникнення розряду величина струму буде визначатися ємністю діелектричних бар'єрів, а значення напруги на розрядному проміжку залишається практично постійним до моменту зникнення розряду. В цьому випадку еквівалентна схема має вигляд послідовно з'єднаних двох (або одного) конденсаторів і ЕРС зі знакозмінною напругою  $\pm V_r$  (рис. 2б). Для наочності проаналізуємо електричні процеси в ланцюгу при живленні електродної системи з діелектричними бар'єрами від джерела високої напруги синусоїдальної форми. Так до виникнення розряду у відповідності з еквівалентною схемою (рис. 2а) миттєве значення напруги та струму на елементах електродної системи (електродах, діелектрику і розрядному проміжку) можна розрахувати за законами електротехніки.

$$V_g = V_0(C_{\text{заг}}/C_g)\sin(\omega t), \quad (1)$$

$$V_r = V_0(C_{\text{заг}}/C_r)\sin(\omega t), \quad (2)$$

$$I = V_0 C_{\text{заг}} \omega \cdot \cos(\omega t), \quad (3)$$

де  $V_0$  – амплітудне значення напруги на озонаторі.

$V_g$  і  $V_r$  – відповідно напруги на діелектричних бар'єрах та розрядному проміжку,  $I$  – струм через електродну систему,  $C_g$ ,  $C_r$ ,  $C_{\text{заг}}$  – відповідно ємності діелектричних бар'єрів, розрядного проміжку та загальна ємність електродної системи:

$$C_{\text{заг}} = C_g C_r / (C_g + C_r) \quad (4)$$

В цей період вирази для середніх і ефективних значень струмів і напруг мають такий вигляд:

$$I_{\text{сф}} = V_0 \omega C_{\text{заг}} / \sqrt{2}, \quad (5)$$

$$I_{\text{сеп}} = 2V_0 C_{\text{заг}} \omega / \pi \quad (6)$$

Коли амплітудне значення напруги живлення на електродах досягне величини напруги виникнення розряду, в газовому проміжку з'являється активний електричний струм і криві струму та напруг будуть мати більш складний вигляд (рис. 3). З моменту виникнення розряду  $t$ , і до моменту його зникнення – досягнення напруги живлення свого амплітудного значення ( $t=T/4$ ), напруга на розрядному проміжку у відповідності з еквівалентною схемою залишається постійною і рівною  $\pm V_r$ . Тоді вираз для напруги на діелектричному бар'єрі буде мати вигляд:

$$V_g = V_0 \sin(\omega t) - V_r \quad (7)$$

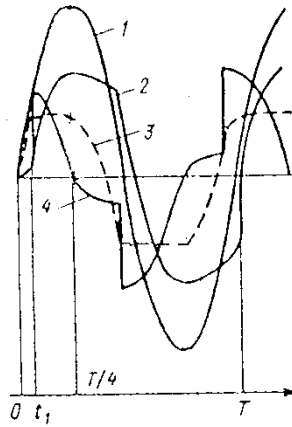


Рис.3. Форма струмів та напруг в бар'єрному розряді:

1. напруга на електродах;
2. напруга на діелектричних бар'єрах;
3. напруга на розрядному проміжку;
4. струм через електродну систему.

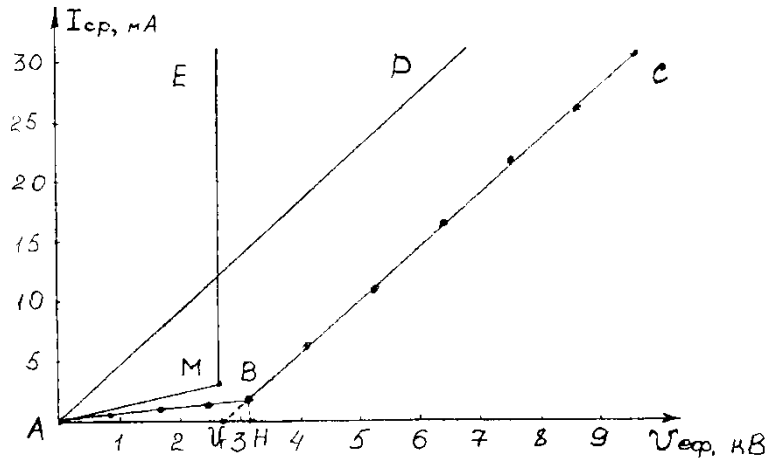


Рис.4. Зовнішня вольт-амперна характеристика бар'єрного розряду.

В цьому випадку струм через електродну систему буде рівним струму через діелектрик:

$$I = d(C_g V_g) / dt = V_0 C_g \omega \cos(\omega t) \quad (8)$$

Із порівняння виразів (3) і (8) видно, що при виникненні розряду спостерігається різка зміна струму, в зв'язку з тим, що  $C_g > C_{заг}$ .

На практиці зручніше користуватися ефективним і середнім значеннями струмів, які одержують інтегруванням виразів (3) та (8). Найбільш явно це питання розглянуто в роботі [2]. Вирази для струмів мають вигляд:

$$I_{ef} = V_0 \frac{C_g \omega}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{2A\omega T_p + A \sin \omega T_p - \pi(A-2)}, \quad (9)$$

$$I_{cp} = (V_0 - V_r) \frac{2}{\pi} C_g \omega, \quad (10)$$

де  $A = \frac{C_r^2}{(C_g + C_r)} - 1$ ;  $\omega T_p = \arcsin[1 - \frac{2V_r(C_r + C_g)}{V_0 C_g}]$ ;  $T_p$  – точка розриву кривої струму.

Ці вирази справедливі після виникнення розряду, коли напруга на електродах вища за напругу виникнення розряду (при  $V_0 \geq \frac{V_r C_r}{C_{заг}}$ ). Із виразів (9) та (10) видно, що залежність  $I_{ef}$  від  $V_0$  носить нелінійний характер, в той час як  $I_{cp}$  від  $V_0$  – лінійний.

На рис. 3, крива 4 зображено інтегральний струм через електродну систему, який представляє собою суму струмів великої кількості короткоживучих мікророзрядів ( $\sim 10\text{нс}$ ), що хаотично виникають в розрядному проміжку заповнюючи весь його об'єм.

На рис. 4. показана вольт-амперна характеристика електродної системи з розрядним проміжком 1 мм. Перший відрізок АВ відповідає залежності  $I_{\text{сер}}=f(U_{\text{эф}})$  при відсутності розряду в озонаторі. Озонатор в цьому випадку являє собою систему послідовно включених конденсаторів ( $C_r$  і  $C_g$ ). Через це нахил цього ділянки характеристики визначається загальною ємністю електродної системи озонатора. Більш складна залежність спостерігається для відрізка характеристики, який відповідає періоду наявності розряду. Ця ділянка не завжди є лінійною, що залежить від багатьох факторів. Перш за все нерівномірність і неодночасність заповнення розрядом розрядного проміжку, викликані зміною характеристик діелектричного бар'єру при зміні струму. Крім цього нелінійність може бути зв'язана також з формою істинної характеристики розряду.

Розглянемо більш детально характеристику електродної системи з розрядним проміжком, відображену на рис. 4. Для порівняння на цьому рисунку показана вольт-амперна характеристика конденсатора з ємністю рівною ємності діелектричного бар'єру (AD), яка йде паралельно зовнішній характеристиці електродної системи при наявності розряду (BC), тобто характеристика AD при тому ж струмові відповідає падінню напруги на діелектричному бар'єрі. Таким чином, різниця напруг, яка визначається характеристиками BC та AD, являє собою по суті падіння напруги на розрядному проміжку, яке збільшується зі збільшенням його ширини. Залежність напруги на розрядному проміжку від струму при виникненні розряду має різкий злом (точка М на ламаній АМЕ). До виникнення розряду ця напруга росте пропорційно струму (відрізок АМ), при цьому пропорційність визначається загальною ємністю електродної системи ( $C_r$  і  $C_g$ ). Після виникнення розряду напруга на розрядному проміжку залишається практично постійною і не залежить від сили струму (відрізок МЕ). Оскільки відрізок МЕ відповідає падінню напруги на розрядному проміжку при наявності розряду, то він по суті і є істинною вольт-амперною характеристикою розряду в даній електродній системі. Таким чином, форма цієї характеристики відображається через характеристику діелектричного бар'єру (ділянка AD) на формі зовнішньої вольт-амперної характеристики всієї електродної системи. Напругу горіння розряду в розрядному проміжку можна знайти продовженням зовнішньої вольт-амперної характеристики до перетину з віссю абсцис ( $V_r$ ). Проекція точки В на вісь абсцис (точка Н) відображає повну напругу на електродній системі в момент виникнення розряду.

При проведенні аналізу не розглядалися питання пов'язані з впливом природи газу, а також його тиску на вольт-амперну характеристику бар'єрного розряду, оскільки в даному випадку бар'єрний розряд використовується в озонаторах, де робочим газовим середовищем являється один газ (повітря або кисень) при тиску близькому до атмосферного.

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що величини напруг на газорозрядній електродній системі з діелектричним бар'єром та її елементах (діелектричному бар'єрі і газовому проміжку) можуть бути змінені за рахунок змін конструктивних параметрів системи (товщина діелектрика та ширина розрядного проміжку), а також електричних параметрів діелектричного бар'єру (діелектрична проникність), які в свою чергу впливають на електричні ємності елементів. В даному випадку перш за все для відчутного зниження відповідних напруг необхідно збільшити ємність діелектричного бар'єру, а також ємність розрядного проміжку. Збільшення ємності розрядного проміжку можна досягти за рахунок зменшення його величини. Але при використанні бар'єрного розряду для генерації озону необхідно створювати відповідний потік газу (повітря або кисню) через розрядний проміжок. В зв'язку з цим (в озонаторах малої та середньої потужності) його розмір встановлюють в межах 0,5 - 1,5мм, оскільки він обмежує вільний прохід газу при тиску близькому до атмосферного. Таким чином, залишається один елемент електродної системи – діелектричний бар'єр, де за рахунок зміни електричних і конструктивних параметрів можна досягти відчутного зниження напруги на озонаторі і підвищити його ефективність. Для цього необхідно підібрати матеріал діелектрика з високою діелектричною постійною і значно зменшити товщину самого діелектричного бар'єру.

### Лабораторна установка

Лабораторна установка змонтована в металічному корпусі з передньою прозорою кришкою, що дозволяє візуально ознайомитись з електричною схемою та спостерігати за розрядом в розрядній камері.

До основного складу установки входять: високовольний трансформатор (Тр), регулятор напруги (ЛАТР), високовольний вольтметр С-96, міліамперметр змінного струму, розрядна камера (озонатор), обмежуючий опір. Спрощена електрична схема установки показана на рис.5. Основною складовою частиною установки є розрядна камера (озонатор), яка являє собою систему двох електродів, на одному з яких нанесений шар діелектрика. Одна з реальних розбірних конструкцій такого озонатора представлена на рис. 6

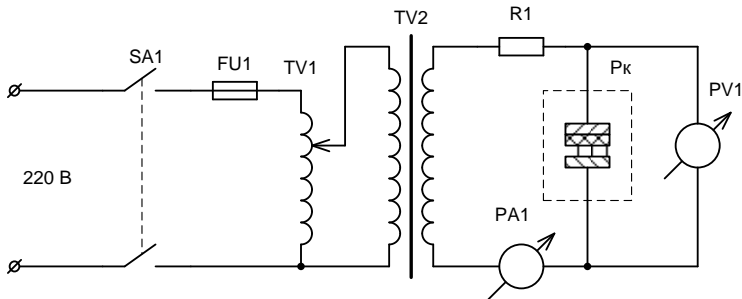


Рис.5. Принципова електрична схема лабораторної установки.

- SA1 – вимикач;
- FU1 – запобіжник;
- TV1 – автотрансформатор;
- TV2 – високовольний трансформатор;
- PA1 – міліамперметр;
- PV1 – кіловольтметр;
- Pк – розрядна камера (озонатор).

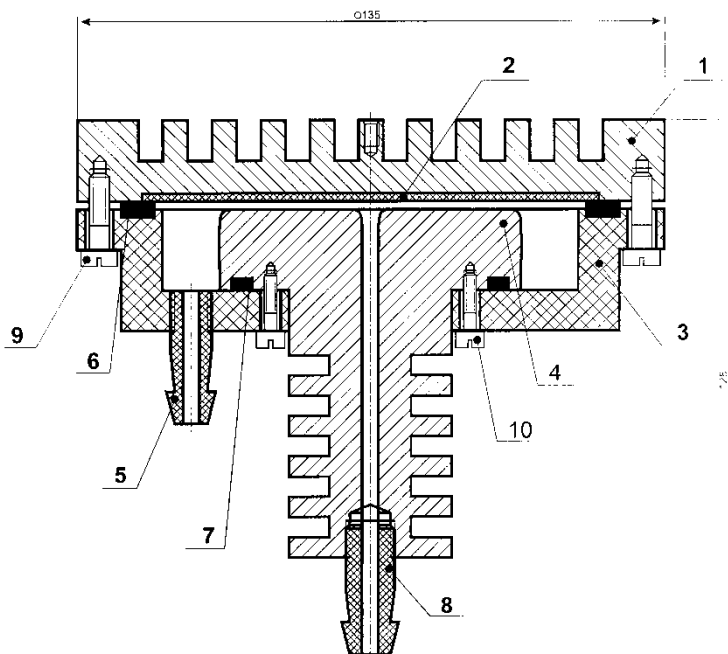


Рис.6. Озонатор з бар'єрним розрядом.

- 1, 4 – металеві електроди;
- 2 – діелектричний бар'єр (скло);
- 3 – ізолятор (органічне скло);
- 5, 8 – відповідно вхідний та вихідний штуцери;

- 6, 7 – фторопластові ущільнюючі кільця;  
9, 10 – з'єднувальні гвинти.

### Програма виконання роботи

1. Вивчити матеріали з бар'єрного розряду за науково-технічною літературою та ознайомитись зі змістом методичних вказівок.
2. Підготувати установку до проведення роботи. Для цього перевірити наявність підключення захисного заземлення, відсутність ушкоджень ізоляції ті шнура підводу живлення, а також елементів установки.
3. Ввімкнути внутрішнє освітлення установки і ознайомитися через прозору кришку з її електричною схемою.
4. Вивести ручку регулятора в крайнє ліве положення. Ввімкнути живлення переведенням вимикача в положення "Вкл".
5. Повільним поворотом ручки регулятора напруги за часовою стрілкою зафіксувати (візуально та за вимірювальними приладами) виникнення розряду в розрядній камері. Записати показання кіловольтметра і міліамперметра. Повернути ручку регулятора в нульове положення.
6. Послідовним поворотом і встановленням ручки регулятора напруги в різні положення змінювати напругу на електродах розрядної камери. Записати в таблицю значення напруги та струму розряду.
7. За отриманими даними побудувати вольт-амперну характеристику. З характеристики визначити напругу виникнення розряду (критичну напругу) та напругу горіння розряду.

### Вимоги до звіту

*(Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.)*

Звіт повинен вміщувати:

1. Ціль роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Рисунки базових схем та структурної схеми лабораторної установки.
4. спрощену електродну конструкцію розрядної камери.
5. Виконані розрахунки.
6. Таблиці з результатами вимірювань та розрахунків.
7. Побудовані за результатами вимірювань та розрахунків графіки (за необхідності).
8. Висновки по роботі.

*(Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.)*

### Контрольні питання

1. Основні ознаки бар'єрного розряду.
2. Умови та механізм виникнення та підтримки бар'єрного розряду.
3. Чим відрізняється бар'єрний розряд від інших типів розряду (тілючого, дугового, коронного)?
4. Як змінюються вольт-амперні характеристики від ширини розрядного проміжку?

5. Як впливає ємність розрядного проміжку та діелектричних бар'єрів на електричні параметри бар'єрного розряду (середній струм та напругу)?
6. Чим визначається потужність бар'єрного розряду?
7. Чому і яким чином в бар'єрному розряді синтезуються хімічно-активні сполуки?

### Література

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.,: Наука,1987.
2. Мик Д., Крегс. Д. Электрический пробой в газах. – М.,; Иностран.лит., 1960.
3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд.МГУ., 1989.
4. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М. Изд.МГУ. 1987.
5. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа. 1967.