

УДК 537.525

Модулювання часу запалення розряду в імпульсній тріодній гарматі високовольтного тліючого розряду

Андріянов В.Ю., д.т.н. Мельник І.В.

Сьогодні технологічні джерела електронів на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР) знаходять широке застосування у промисловості. Особливо перспективним є використання таких джерел електронів у електронній промисловості, у приладобудуванні, у машинобудуванні та у металургії. За їх допомогою можна виконувати такі термічні операції, як високошвидкісне зварювання тонкостінних виробів у низькому та середньому вакуумі, нанесення композитних покриттів у середовищі активних або інертних газів за умови низького тиску, високошвидкісне вакуумне переплавлення тугоплавких металів із метою їх рафінування, високошвидкісне відпалювання малогабаритних виробів.

Між моментом прикладення імпульсу напруги та запаленням розряду, проходить деякий час - час затримки, який складається з статистичного часу затримки імпульсу струму t_c після прикладення імпульсу напруги та часу формування імпульсу струму розряду t_ϕ до сталого значення, яке визначається параметрами електродної системи, газового

середовища та ланцюгу живлення. Тобто:

$$t_s = t_c + t_\phi \quad (1)$$

В дослідженнях тріодної електродної системи імпульсний режим потужного ВТР реалізовувався методом електричного керування, який значно зменшує інерційність процесів в розрядному проміжку (стала часу при такому способі керування залежить від інерційності процесів в анодній плазмі і становить менше однієї мілісекунди). При цьому для запалення несамотійного керуючого розряду необхідною є наявність постійного слабкострумового ВТР малої потужності.

У такому випадку t_c можна прийняти рівним нулю, оскільки в розрядному проміжку допоміжного розряду присутня плазма ВТР.

Що стосується часу формування імпульсу струму t_ϕ , він визначається двома головними процесами, які протікають у тріодному проміжку ВТР. Це процеси іонізації газу та процеси амбіполярної дифузії часток із плазми на катод допоміжного розряду.

Для визначення часових параметрів імпульсного ВТР, пов'язаних із дифузійними та іонізаційними процесами, в розрахунки вводиться віртуальний анод, який розташовується на відстані x_0 від катоду допоміжного розряду. Тоді загальний струм катоду визначається виразом:

$$i(t) \approx i_0 + \gamma \left(\exp(\eta_i U_p) - 1 \right) i(t - t_i) = i_0 + (G + 1) i(t - t_i) \quad (2)$$

де i_0 – струм у паузі між імпульсами; η_i – коефіцієнт іонізації; U_p – напруга горіння низьковольтного розряду; γ – узагальнений коефіцієнт іонно-електронної емісії; t_i – середній час руху позитивно зарядженого іону від віртуального аноду до катоду; G – коефіцієнт:

$$G = \exp \left(- \frac{\phi_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{кер}}} \right) \left[\gamma \left[\exp(\eta_i U_p) - 1 \right] - 1 \right] \quad (3)$$

де T_e – температура електронів в плазмі, ϕ_i – потенціал іонізації газу.

Часові параметри імпульсного режиму роботи тріодної електродної системи ВТР вибирались типовими для більшості технологічних процесів, тобто $t \gg t_i$, тому час запалювання ВТР не залежить від поперечного розміру проміжку. Головні геометричні параметри динамічної системи ВТР, яка моделюється, наведені на рис.1.

Згідно з моделлю розрядного проміжку, яка розглядається, загальний струм з катода дорівнює:

$$i(t) \approx i_0 + (G + 1) \left[i(t) - \frac{di(t)}{dt} t_i \right] \Rightarrow \int_{i_0}^{i(t)} \frac{di(t)}{i_0 + Gi(t)} = \int_0^t \frac{dt}{(1 + G)t_i} \Rightarrow \ln \left[\frac{i_0 + Gi(t)}{(1 + G)i_0} \right] \approx \ln \left[\frac{Gt}{(G + 1)t_i} \right] \quad (4)$$

Тоді струм основного розряду зростає від i_0 до I_p за такий час:

$$t_\Phi = \frac{t_i}{G} \ln \left(1 + \frac{GI_p}{i_0} \right) \quad (5)$$

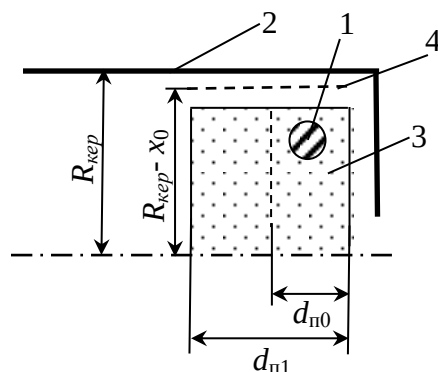


Рис. 1. Модель віртуального анода для допоміжного розряду

1 – кільцевий анод допоміжного розряду,

2 – катод допоміжного розряду, 3 – анодна плазма, 4 – віртуальний анод.

Тоді середній час формування потужного імпульсу струму ВТР в тріодній електродній

системою оцінюється з наступного виразу:

$$\overline{t_{\phi}} = \frac{9kT_e(d_{n1} - d_{n0})}{8(\pi e)^3 \mu_{io} \gamma R_{кер} \ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_{кер})^3}{\pi P_{рп}}} \right)}$$

Де $R_{кер}$ - радіус керуючого електроду;

μ_{io} - рухомість іонів в анодній плазмі;

$P_{рп}$ - тиск газу в розрядному проміжку;

d_{n1} , d_{n0} - положення межі анодної плазми відносно катоду в імпульсі та у паузі відповідно,

або:

$$\overline{t_{\phi}} = \frac{K_{кер} (d_{n1} - d_{n0})}{\ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_{кер})^3}{\pi P_{рп}}} \right)} \quad (6)$$

де $K_{кер}$ - коефіцієнт керування, який залежить від роду газу та матеріалів електродів і визначається через співвідношення:

$$K_{кер} = \frac{1,125kT_e}{(\pi e)^3 \mu_{io} \gamma G} \quad (7)$$

Приведені теоретичні оцінки показують, що час формування імпульсу залежить від прискорюючої напруги, струму розряду в паузі між імпульсами та напруги на керуючому електроді (рис.2) і буде зменшуватись при їх зростанні.

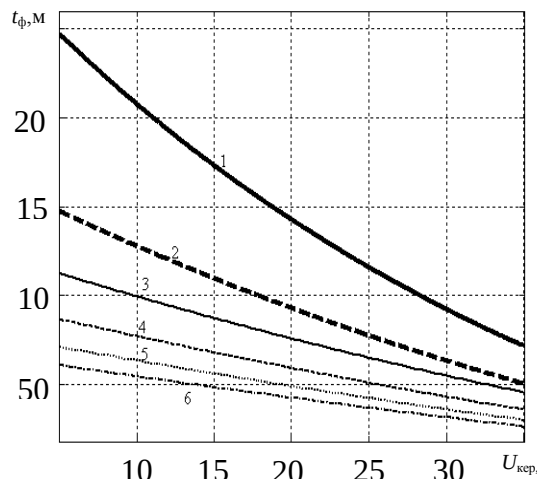


Рис. 2. Залежність часу запалювання ВТР від напруги допоміжного розряду та від робочого тиску джерела електронів:

1 – $P_{рп} = 0,2$ Па; 2 – $P_{рп} = 0,3$ Па;
3 – $P_{рп} = 0,4$ Па; 4 – $P_{рп} = 0,5$ Па;
5 – $P_{рп} = 0,6$ Па; 6 – $P_{рп} = 0,7$ Па;
 $U_p = 20$ кВ;

Висновки

Отримані аналітичні співвідношення для часу запалювання розряду у тріодних системах ВТР, які ґрунтуються на рівняннях балансу іонів у анодній плазмі та самостійності горіння ВТР і враховують вплив допоміжного розряду на концентрацію іонів анодної плазми та її об'єм.

Отримані співвідношення дозволяють оцінювати час перемикання струму розряду у технологічних джерелах електронів, який є одним із важливих параметрів сучасного швидкодіючого електронно-променевого обладнання.

Література

1. Аппроксимация положения и формы границы анодной плазмы в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда / [Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А.] // Электроника и связь, тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии», часть 1 (2009).
2. Каспер Э. Теоретические основы электронной оптики. Т. 2 / Каспер Э., Хокс К. // – М.: Мир, 1993
3. Мельник И.В. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда / Мельник И.В., Тугай С.Б. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника – Т. 55. - № 11 – 2012.