

УДК 533.9.011

Б.О. Дем'янчук

Одеський національний університет ім. І.І.Мечникова, вул. Довженко, 7а,

Умови плазмових утворювань при НВЧ-пробі в суміші іоноутворюючої речовини та частинок легких металів

Одержані кількісні оцінки умов плазмових утворювань під час мікрохвильової дії на порошок-суміш іоноутворюючої речовини і частинок легких металів: критичний рівень електричної напруженості електромагнітного поля, який потрібен для виникнення іскрового розряду і запалювання порошку легких металів, а також рівень частоти електромагнітних коливань, необхідний для підтримання процесу плазмоутворювання. Отримані оцінки загального електричного заряду, який накопичується в оксидному шарі частинок металів до моменту НВЧ-пробою.

В останні роки спеціалісти багатьох країн активно досліджують проблему взаємодії НВЧ-поля з низькотемпературною плазмою[1,2]. Вважається, що зараз повинні бути вирішені такі складові завдання загальної проблеми:

- оптимізація енерговитрат на виконання практичних задач;
- оцінка параметрів плазмоутворення під час дії НВЧ-поля.

Метою статті є кількісний аналіз суттєвих залежностей між фізичними умовами, які потрібні при НВЧ-пробі плазмоутворюючої хмари та які реалізуються. Це сприяло би подальшому просуванню також досліджень щодо вирішення складових завдань загальної проблеми.

При взаємодії НВЧ-поля з металевим порошком на поверхні частинок виникає поверхневий струм, який призводить до електростатичної зарядки поверхневої окисної плівки, яка завжди вкриває ці частинки. Заряди на оксидній поверхні металевих частинок при достатній потужності НВЧ-поля у плазмоутворюючому середовищі, яка створена попередньо, можуть приводити до виникнення електричного іскрового розряду, за допомогою якого стає можливим ініціювання запалювання металевого порошку. З іншого боку, горіння порошку в НВЧ-полі безумовно призводить до нерівновагової іонізації частинок. Тому в роботі експериментально досліджена можливість отримання нерівновагових плазмових утворювань шляхом ініціювання запалювання металевого порошку у НВЧ-полі.

Експерименти проводились в камері об'ємом 18л., в якій створювалося рівномірне НВЧ-поле з частотою 2450 МГц і напруженістю поля 3700 В/м. Металевий порошок АСД-4 насипали на діелектричну (фторопластову) поверхню. Запалююча іскра ініціювалася між металевими частинками алюмінію і магнію.

Оцінювання критичного значення напруженості електричного поля $E_{кр}$ проведено виходячи з умови, при якій припускалося, що при $E_{кр}$ вільний електрон на відстані середньої довжини вільного пробігу набуває енергії, яка дорівнює потенціалу іонізації молекули. З іншого боку, фактична напруженість поля E в об'ємі, якій досліджується, повинна бути більшою, або дорівнювати критичній енергії.

$$E = \frac{1}{\text{Rarctg}D_0/2R} \sqrt{\frac{PT_n}{2\tau}} W \geq E_{кр}, \quad (1)$$

де P – середня потужність джерела випромінювання електромагнітних коливань;

W – хвильовий опір плазмоутворюючого середовища;

τ і T_n – тривалість і період проходження імпульсів;

R – відстань до джерела випромінювання;

D_0 – діаметр хмари плазмоутворюючого середовища, узгоджений з діаметром поперечного перетину діаграми спрямованості НВЧ-випромінювача.

При іскровому нагрівачому впливі НВЧ-поля на плазмоутворююче середовище з додаванням металевго порошку, кінетичну енергію найшвидкіших молекул можна порівняти з енергією зв'язку електронів в атомах цього середовища, і починається іонізація газу. Довільне розділення зарядів в цих утвореннях можливе, як відомо, лише за умови, що робота проти електричного поля, яку потрібно при цьому здійснити, є меншою, ніж теплова енергія частинки, оскільки у вказаних утвореннях електростатична взаємодія є настільки великою, що свавільне розділення зарядів є можливим лише в тих областях, які за розміром порівнянні з дебаєвським радіусом D .

Енергія електростатичного поля плазмового утворення має вигляд:

$$W_e = \frac{q^2}{2S\xi/d} = \frac{e \cdot (n \cdot S \sqrt{\frac{3}{2}} D)^2}{2 \cdot S \cdot \xi / 10D} = \frac{10e \cdot n^2 \cdot S \cdot \frac{3}{2} D^3}{2\xi} \quad (2)$$

де q – заряд частинок;

S – площа шару нерівновагової області;

ξ – діелектрична проникливість;

n – концентрація електронів;

e – заряд електрона;

d – відстань між шарами нерівновагової області плазмоутворюючої хмари.

У прикладі відстань між шарами нерівновагової області обрана $10D$.

Повна теплова енергія W_m усіх частинок через напруженість електричного поля, яка дорівнює E , має таку залежність

$$W_m = n \cdot S \cdot 30D \cdot k \frac{\sigma}{c \cdot \rho} E^2 \cdot t_0 \quad (3)$$

де σ – питома теплопровідність середовища;

c – теплоємність середовища;

ρ – щільність середовища;
 t_0 – час впливу НВЧ-поля.

Дорівнюючи (2) і (3) у відповідності із законом збереження енергії, отримуємо критичне значення напруженості електричного поля, яке дорівнює:

$$E_{\text{кр}} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{e \cdot n \cdot c \cdot \rho}{k \cdot \xi \cdot \sigma \cdot t_0}} \quad (4)$$

Тоді умова отримання нерівновагових плазмових утворювань набуває вигляду:

$$\frac{1}{R \arctg D_0 / 2R} \sqrt{\frac{P \cdot T_n}{2\tau} W} \geq \frac{D}{2} \sqrt{\frac{e \cdot n \cdot c \cdot \rho}{k \cdot \xi \cdot \sigma \cdot t_0}} \quad (5)$$

Параметрами n , c , ρ , σ , ξ , t_0 можна керувати при дослідженні процесу плазموутворення.

Оскільки у термодінамічно нерівноваговій плазмі швидких частинок може бути більше, ніж тих, які рухаються повільно, та ті хвилі, чії фазові швидкості можуть потрапляти в діапазон швидкостей електронів, можуть перевідбиватися резонансними частинками (ефект зворотного згасання Ландау), то для досягнення ефекту підтримання процесу отримання нерівновагових плазмових утворювань, ленгмюрівська частота коливань цих часток через ефект поляризації (зміщення плазмових частинок) повинна бути співрозмірною (або трохи меншою) за частоту впливу поля f , тобто повинна виконуватися ще одна умова: частота електромагнітних коливань повинна бути співрозмірною з величиною, яка дорівнює

$$f \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n \cdot e \cdot 2}{\xi m_e}}, \quad (6)$$

де m_e – маса електрона.

Визначимо заряд, який накопичується на частинці до моменту пробою. Для цього знайдемо спочатку заряд, який наводиться. Відомо, що пробій (іскріння) в повітрі між металевими структурами трапляється при нормальних атмосферних умовах, якщо електрична напруженість поля дорівнює:

$$E_{\text{пред}} = 30 \text{ кВ/см} = 3 \text{ кВ/мм} = 3 \text{ в/мкм}$$

В дослідженні, яке розглядається, напруженість електричного поля дорівнює $E_e \cong 3,5 \text{ кВ/м} = 3,5 \text{ В/мм}$. Таким чином, в дослідженні іскріння виникає у випадку, якщо відстань між металевими частинками приблизно дорівнює 1 мкм. Як бачимо, оскільки частинки вкриті оксидним шаром товщиною меншою 1 мкм, то іскріння виникає між близько розташованими, контактуючими (через тонку оксидну плівку) частинками.

Оцінимо заряд, який викликає пробій діелектричного проміжку з розміром $l_1=1 \text{ мкм}$. Нехай цей проміжок має питомий опір r , площа поперечного перетину частинок, наприклад, циліндричної форми, дорівнює S_1 . Тоді опір одного проміжку, який пробивається, дорівнює:

$$R_n = r \frac{l_1}{S_1}.$$

Враховуючи, що на ділянці пробою довжиною l_1 діє $E_e \cdot 10^{-3} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ В/мкм, тобто діє електричний потенціал, який дорівнює $u = 3,5 \cdot 10^{-3}$ В, маємо електричний струм іскріння, який дорівнює:

$$i = \frac{u}{R_n} = \frac{u \cdot S_1}{r \cdot l_1} \quad (7)$$

Тоді, якщо елементарне іскріння триває час, який дорівнює t_1 , то заряд, який накопичується на частинці до початку пробою приблизно дорівнює:

$$q_1 = i \cdot t_1 = \frac{u \cdot S_1 \cdot t_1}{r \cdot l_1} \quad (8)$$

Тоді загальний заряд можна визначити, враховуючи кількість часток в об'ємі, який досліджується, якщо відомі розміри частинок з діаметром d_1 та величина об'єму, який досліджується:

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{D_0^3}{8} \quad (9)$$

Визначимо кількість металевих частинок в об'ємі V , який досліджується для випадку, коли відношення між сумарними масами металевих частинок і частинок плазмоутворюючої речовини відомо і дорівнює m_m/m_p , а ця речовина містить відомі долі α_i шістьох складових: азоту, кисню, аргону, калію, натрію і парів води з густиною ρ_i .

Тоді сумарна маса металевих частинок у визначеному об'ємі утворення нерівновагової плазми дорівнює

$$m_m = \frac{\pi}{6} D_0^3 \cdot \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot \rho_i \quad (10)$$

Якщо металеві частинки, наприклад, алюмінію і магнію з густиною ρ_a та ρ_m , мають сферичну форму з діаметром d_1 , то середня маса частинки дорівнює

$$m_1 = \frac{\rho_a + \rho_m}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi \frac{d_1^3}{8} \quad (11)$$

Тоді концентрація металевих частинок в об'ємі (9) дорівнює

$$n = \frac{m_m}{m_1} = 2 \left(\frac{D_0}{d_1} \right)^3 \frac{\sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot \rho_i}{\rho_a + \rho_m} \quad (12)$$

В результаті загальний заряд, який накопичується на частинках в об'ємі V до моменту пробою тривалістю t_1 , дорівнює

$$Q = q_1 \cdot n = \frac{u \cdot S_1 \cdot t_1}{r \cdot l_1} \cdot 2 \left(\frac{D_0}{d_1} \right)^3 \frac{\sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot \rho_i}{\rho_a + \rho_m} \quad (13)$$

З (13) витікає, що, наприклад, при $u = 3,5 \cdot 10^{-3}$ В; $l_1 = 10^{-7}$ м; $S_1 = \pi \cdot (l_1/2)^2$; $t_1 = 1$ с; $r = 10^{-3}$ Ом·м; $D_0 = 0,5$ м; $d_1 = 10^{-7}$ м; $\rho_a = 2700$ кг/м³; $\rho_m = 1739$ кг/м³; $\rho_1 = 1,25$ кг/м³; $\rho_2 = 1,43$ кг/м³; $\rho_3 = 1,78$ кг/м³; $\rho_4 = 860$ кг/м³; $\rho_5 = 970$ кг/м³; $\rho_6 = 1000$ кг/м³; $\alpha_1 = 0,7$; $\alpha_2 = 0,2$; $\alpha_3 = 0,097$; $\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0,001$ заряд, який накопичується в діелектричному середовищі, дорівнює $Q = 25,8 \cdot 10^3$ Кул.

ВИСНОВОК.

Таким чином, незважаючи на ілюстративний характер наведених кількісних залежностей, припустимо вважати, що, по-перше, реалізація умов, необхідних для створення нерівновагових плазмових утворень, цілком можлива за допомогою засобів, які існують на теперішній час; по-друге, для ініціювання пробою найбільш доцільним є потужне імпульсне випромінювання, яке повинно бути пропорційним кубу відношення діаметру області плазмоутворення до діаметру металевих частинок, які додаються до плазмоутворюючого середовища, а також пропорційним до часу існування плазмового утворення. По-третє, необхідно особливо відмітити, що істотне підвищення ефективності і швидкості нагріву плазмоутворюючої області, яка містить іоноутворюючу речовину і частинки легких металів, можливо лише при погодженому у просторі впливі поля на область, яка ініціюється як у поперечному її перетині, так і за глибиною, яка залежить від виду і концентрації частинок в області, у відповідності з відомими раціональними принципами мікрохвильового нагріву [3].

Література

1. "Trust": Russians propose joint SDI using plasmoids // 21st century Science & technology. Summer 1993/ - P.385.
2. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, –1973.
3. Демьянчук Б.А. Принципы и применения микроволнового нагрева. – Одесса: Черноморье, 2004. –520 с.

Б.А. Демьянчук

Условия плазмообразования при СВЧ-пробое в смеси ионообразующего вещества и частиц легких металлов.

АННОТАЦИЯ

Количественно оценены условия плазмообразования при микроволновом воздействии на порошкообразную смесь ионообразующего вещества и частиц легких металлов: критический уровень напряженности электрического поля, который необходим для возникновения искрового разряда и воспламенения порошка металлов, а также уровень частоты электромагнитных колебаний, необходимый для поддержания процесса плазмообразования. Оценен общий электрический заряд, накапливающийся в оксидном слое частиц металлов до момента СВЧ-пробоя.

B.A. Demyanchuk

Conditions of plasma-formation at SHF-disruption in the mix of ion-formative substance and particles of light metals

SUMMARY

Conditions plasma-formation were quantitatively estimated at microwave influence on powder mix of ion - forming substance and particles of light metals: critical level of electric field intensity necessary for occurrence of spark discharge and ignition of the metal powder, and also level of electromagnetic fluctuations, frequency necessary for maintenance of plasma-formation process. The general electric charge collecting in an oxide layer of metals particles till the moment of the SHF-disruption was estimated.