

УДК 533.9.011

Б.О. Дем'янчук¹, В.І. Карпенко², Г.О. Моїсєєва²¹Одеський національний університет ім. І. Мечникова, Одеса²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПРОСТОРОВІ ПЛАЗМОВІ УТВОРЕННЯ ПРИ НВЧ-ПРОБИВАННІ В СУМІШІ ІОНОУТВОРЮЮЧОЇ РЕЧОВИНИ ТА ЧАСТИНОК ЛЕГКИХ МЕТАЛІВ

Одержані кількісні оцінки умов плазмових утворень під час мікрохвильового впливу на порошок-суміш іоноутворюючої речовини і частинок легких металів: потрібного рівня напруженості поля, необхідної частоти коливань і загального електричного заряду в заданому об'ємі простору.

Ключові слова: просторові плазмові утворення, іоноутворюючі речовини, ленгмюрівські частоти коливань плазми.

Вступ

В останні роки спеціалісти багатьох країн активно досліджують проблему взаємодії НВЧ-поля з низькотемпературною плазмою [1 – 4]. Вважається, що за допомогою створеного керованого по координатах, об'єму та концентрації електронів плазмового середовища можливо вирішувати ряд важливих технічних задач, а саме: каналізацію електромагнітної енергії у важкодоступні райони планети; забезпечення оптимальних польотів повітряних суден; створення антен біжучої хвилі з малим часом існування; пошкодження повітряних чи космічних об'єктів, або зміна траєкторій їх польотів, та ряд інших важливих для народного господарства задач.

При цьому, важливою умовою для реалізації цієї задачі є забезпечення відповідної, а краще – мінімальної, напруженості електромагнітного НВЧ-поля, що забезпечує утворення просторової плазми. Особливо актуальним це питання стає при забезпеченні НВЧ-пробою в умовах атмосфери. Одним з ефективних напрямків зменшення напруженості електромагнітного поля НВЧ-пробою є використання в атмосфері іоноутворюючої речовини та частинок легких металів.

Метою статті є кількісний аналіз суттєвих залежностей між фізичними умовами, що викликають НВЧ пробивання плазموутворюючої суміші, що включає вище згадані іоноутворюючі речовини.

Основна частина

При взаємодії НВЧ-поля з металевим порошком плазмоутворюючої суміші на поверхні частинок виникає поверхневий струм, який призводить до електростатичного заряджання поверхневої оксидної плівки, яка завжди вкриває ці частинки. Заряди на оксидній поверхні металевих частинок при достатній потужності НВЧ-поля у плазмоутворюючому середовищі, що створено попередньо, можуть призводити до виникнення електричного іскрового роз-

ряду, 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 досліджена можливість отримання нерівновагових плазмових утворень шляхом ініціювання запалювання металевого порошку у НВЧ-полі.

Оцінювання критичного значення напруженості електричного поля $E_{кр}$ проведемо 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, де забезпечується пробій, повинна бути більшою, або дорівнювати критичній енергії:

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

де P – середня потужність джерела випромінювання електромагнітних коливань; W – хвильовий опір плазмоутворюючого середовища; ϕ 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 металевого порошку, кінетична енергія найшвидших молекул може стати рівною до енергії зв'язку електронів в атомах цього середовища. Такі умови забезпечують початок іонізації газу. Розділення зарядів в цих утвореннях можливе, як відомо, лише за умови, що робота проти електричного поля, яку потрібно при цьому здійснити, є меншою, ніж теплової енергії частинки, оскільки у вказаних утвореннях електростатична взаємодія є настільки великою, що самодовільне розділення зарядів є можливим лише в тих областях, які за розміром порівнянні з дебаєвським радіусом D .

За таких умов енергія електростатичного поля плазмового утворення має вигляд:

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

де q – заряд частинок; S – площа шару нерівновагової області; ϵ – діелектрична проникність; n – концентрація електронів; e – заряд електрона; d – відстань між шарами нерівновагової області плазмоутворюючої хмари.

У розрахунках, що здійснювались, 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 y – питома електропровідність середовища; c – теплоємність середовища; ρ – щільність середовища; t_0 – час впливу НВЧ-поля; k – коефіцієнт тепло ізоляваності процесу.

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

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

Тоді умова отримання нерівновагових плазмових утворень набуває вигляду

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

Параметрами n , c , y , ρ , t_0 можна керувати при дослідженні процесу плазмоутворення.

Оскільки у термодинамічно 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 перебудуватися резонансними частинками (ефект зворотного згасання Ландау), то для досягнення ефекту підтримання процесу отримання нерівновагових плазмових утворень, 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

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

де m_e – маса електрона.

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

$E_{гр} = 30 \text{ кВ/см} = 3 \text{ кВ/мм} = 3 \text{ В/мкм}$.

Експерименти проводились в камері об'ємом 18 л, 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.

Припустимо, що 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 пробивання діелектричного проміжку з розміром $l_1 = 1 \text{ мкм}$. Нехай цей проміжок має питомий опір r , площа поперечної 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 $E_e M10^{-3} = 3,5 M10^{-3} \text{ В/мкм}$, тобто діє електричний потенціал, який дорівнює $u = 3,5 M10^{-3} \text{ В}$, 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 наближено 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 частинок в об'ємі, який досліджується, відомі розміри частинок з діаметром d_1 та величину об'єму, який досліджується та дорівнює

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

Визначимо кількість металевих частинок в об'ємі V 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 b_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 пробивання 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, за умов, коли електричний потенціал $u = 3,5M10^{-3}$ В; довжина ділянки пробую $l_1 = 10^{-7}$ м; площа поперечного перетину частинок $S_1 = \rho M(l_1/2)^2$; час елементарного іскріння $t_1 = 1$ с; питомий опір діелектричного проміжку $r = 10^{-3}$ ОмМм; діаметр хмари плазмоутворюючого середовища $D_0 = 0,5$ м; діаметр металевих частинок $d_1 = 10^{-7}$ м; густина алюмінію $\rho_a = 2700$ кг/м³; густина магнію $\rho_M = 1739$ кг/м³; густини шістьох складових: азоту $\rho_1 = 1,25$ кг/м³; кисню $\rho_2 = 1,43$ кг/м³, аргону $\rho_3 = 1,78$ кг/м³; калію $\rho_4 = 860$ кг/м³; натрію $\rho_5 = 970$ кг/м³ і парів води $\rho_6 = 1000$ кг/м³; їх долі відповідно $b_1 = 0,7$; $b_2 = 0,2$; $b_3 = 0,097$; $b_4 = b_5 = b_6 = 0,001$, заряд, який накопичується в діелектрично-середовищі, дорівнює $Q = 6,4M10^{10}$ К.

Висновки

1. Додавання різних сумішей суттєво зменшує напруженість електричного поля, необхідного для забезпечення пробивання в атмосфері.

2. Найбільш суттєвий вплив на величину заряду, який накопичується на частинках в об'ємі V до моменту пробивання тривалістю t_1 , мають розміри частинок плазмоутворюючого середовища.

3. Наступним етапом даної роботи є визначення впливу різних сумішей на час релаксації плазмового утворення.

Список літератури

1. "Trust": Russians propose joint SDI using plasmoids // 21st century. Science & technology. – Summer 1993. – P. 385.
2. Литовкин В. Накануне Ванкувера Россия предлагает США совместный эксперимент с плазменным оружием / В. Литовкин // Известия. – 1993, 2 апр.
3. Карпенко В.И. Анализ зарубежных программ создания оружия на основе использования искусственных плазменных образований для борьбы с воздушно-космическими средствами нападения / В.И. Карпенко, М.К. Можар, Б.В. Панаско // Наука і оборона. – К., 1994. – С. 3-7.
4. Гуревич А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А.В. Гуревич, А.Б. Шварцбург. – М.: Наука, 1973. – 340 с.
5. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие / А.И. Ахиезер. – К.: Наукова думка, 1981. – 471 с.
6. Патент України № 64061А. Спосіб отримання просторової плазми в електромагнітному полі / Дем'янчук Б.О. ; від 16.02.2004 р.
7. Геккер И.Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой / И.Р. Геккер. – М.: Атомиздат, 1978 – 310 с.

Надійшла до редколегії 5.08.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

УСЛОВИЯ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВЧ-ПРОБОЕ В СМЕСИ ИОНООБРАЗУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА И ЧАСТИЦ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ

Б.А. Демьянчук, В.И. Карпенко, Г.А. Моисеева

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

Ключевые слова: пространственные плазменные образования, ионообразующие вещества, ленгмюровские частоты колебаний плазмы.

TERMS OF PLASMA-FORMING AT A MICROWAVE-HASP IN MIXTURE OF ION FORMATION MATTER AND PARTICLES OF EASY METALS

B.A. Dem'yanchuk, V.I. Karpenko, G.A. Moiseeva

In number the terms of plasma-forming are appraised at the microwave affecting powdery mixture of ion formation matter and particles of easy metals: critical level of electric tension of the field, which is needed for the origin of a spark digit and self-ignition of powder of metals, and also level of frequency of electromagnetic vibrations, necessary for support of process of plasma-forming. A general electric charge, accumulative in the oxide layer of particles of metals to the moment of microwave-hasp, is appraised.

Keywords: spatial plasma educations, ion formation matters, Langmuir frequencies of vibrations of plasma.