

УДК 539

А.В. Євченко, студ.  
Житомирський інженерно-технологічний інститут  
О.В. Котик, аспір., м.н.с.  
А.О. Новіков, д.т.н., проф.  
Вінницький державний технічний університет

## ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВИЙ РОЗРЯД В ГАЗОРОЗРЯДНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕЛЕКТРОНІВ

*Характеризується один з видів нестійкості при взаємодії електронного пучка з плазмою – пучково-плазмовий розряд. Проаналізовані та описані умови виникнення та існування даного типу розряду та його вплив на процеси, які відбуваються в газорозрядних джерелах електронів високовольтного тліючого розряду. Проаналізовані особливості пучково-плазмової взаємодії і, зокрема, пучково-плазмового розряду в високовольтному тліючому розряді. Наведені нові можливі сфери використання при врахуванні пучково-плазмової нестійкості.*

Вивчення процесів взаємодії електронних пучків з плазмою та оволодіння ними призводить до нових можливостей застосування пучків. Це відноситься як до створення технологій, заснованих на плазмохімічних процесах, так і до побудови потужних широкосмугових генераторів і підсилювачів НВЧ-коливань. Збільшення потужності та ширини смуги випромінювання приладів НВЧ, у свою чергу, розширює можливість їхнього промислового застосування.

Фізичні об'єкти, в яких має місце колективна взаємодія електронного пучка з плазмою або принаймні існують умови для такої взаємодії, настільки ж поширені, як і різноманітні. Серед них і дуга низького тиску з розжареним катодом, і високовольтний тліючий розряд, і полярне сійво атмосфери, і плазма, що утворюється в процесі електронно-променевої обробки матеріалів (при плавіці, зварюванні, випаровуванні). Висуваються пропозиції та проходять сироби усвідомлено використовувати це явище в різноманітних цілях: для створення плазми в плазмохімічних реакторах, в іонних джерелах, при активних експериментах у космосі, для генерації мікрохвильового електромагнітного випромінювання, для нагрівання плазми. Тому система "електронний пучок – плазма" вже понад п'ятдесят років привертає до себе увагу. Інтерес до ефектів пучково-плазмової взаємодії обумовлюється і тим, що вони відображають фундаментальні властивості плазми. Особливо слід підкреслити, що існує безліч взаємозалежних нестійкостей та нелінійних коливань, можливих у пучково-плазмовій системі. Також зазначимо наявність легко збуджуваних високочастотних електронних гілок коливань. Здійснюється пучкове розхитування різноманітного виду низькочастотних коливань і за участю іонів. При достатньо високому рівні електронних ленгмюровських коливань можуть виявитися істотними процеси взаємодії хвиль (їх розпад, модуляційна нестійкість, каллапс), які також проходять за участю іонів і забезпечують, зокрема, один із каналів дисипації високочастотних хвиль. Якщо до цього додати, що виникнення колективних полів у середовищі з невисоким ступенем іонізації супроводжується ще і газорозрядними ефектами, то стане ясно, наскільки важким є створення всеосяжних єдиних уявлень про електронно-пучкову плазму.

Механізм збудження електронних хвиль став зрозумілий після відкриття плазменно-пучкової нестійкості, що стимулює великі теоретичні дослідження взаємодії пучка з плазмою в лівійному наближенні, а також відповідні експерименти [8]. В даній роботі встановлено, що в тих випадках, коли ступінь іонізації в плазмі невисокий, а пучок досить щільний, збуджувані коливання виявляються у світінні плазми. Коливання впливають на зовнішній вигляд пучково-плазмової системи двояким чином. По-перше, високочастотне поле викривляє траєкторії пучкових електронів і тим самим у відсутність магнітного поля видозмінює більш-менш чітко обкреслений світлий слід пучка, що виникає через збудження атомів ударами його швидких електронів; з іншого боку, оскільки у видиме випромінювання істотний внесок вносять і атоми, збуджувані ударами щодо повільних плазмових електронів, середня кінетична енергія яких залежить від амплітуди колективних коливань, тому яскравість і колір різноманітних областей системи корелюють із просторовим розподілом інтенсивності ВЧ-полів.

Особливості світіння плазми призводять до думки про те, що збуджуване пучком подовжне високочастотне поле може істотно позначитися на балансі заряджених часток у плазмі. І дійсно, вимірювані значення щільності плазми [1], яка утворюється інжекцією щільного пучка в газ, на порядки перевищує ті, що варто було б очікувати при врахуванні одних лише парних

зіткнень пучкових електронів з атомами. Більш того, зміна щільності плазми з тиском носить характер пробою газу – при досягненні деякого критичного тиску концентрація плазми зростає стрибкоподібно, з одночасним виникненням інтенсивних НВЧ-коливань.

При подальшому аналізі робіт встановлено, що у визначених умовах в системі “плазма – пучок” розвиваються колективні пучково-плазмові взаємодії, умови проходження пучка при цьому різко погіршуються аж до повного його блокування, що при великих потужностях може призвести до аварійної ситуації. Тому при розробці й експлуатації таких систем необхідно враховувати пучково-плазмові процеси та критерії стійкості пучка.

При експериментальному дослідженні взаємодії пучків електронів із нейтральним або слабо іонізованим газом у відсутність зовнішніх постійних або високочастотних полів було встановлено явище пучково-плазмового розряду, що полягає в інтенсивній іонізації при пробіі газу [3]. Це явище має місце як при наявності зовнішнього магнітного поля, так і при його відсутності. Як виявилось надалі, явище плазмово-пучкового розряду має важливе значення та широко поширене не тільки в різноманітних земних установках і приладах, але й у космічній плазмі.

В даний час існує два підходи до опису пучково-плазмового розряду (ППР). У першому [4, 5] ППР трактується як колективний пучково-плазмовий пробій газу при проходженні через нього нерелятивістських слабкострумівих пучків. Таким чином, лавиноподібний процес пробою розвивається через зіткнення електронів плазми з атомами нейтрального газу.

Якісна картина ППР при цьому підході така: електронний пучок, проходячи через нейтральний газ, створює в результаті парних зіткнень плазму з щільністю порядку щільності пучка. При взаємодії пучка з такою плазмою розвиваються нестійкості, а електрони плазми пабувають енергію, достатню для іонізації. В результаті цього зіткнення плазмових (вже не пучкових) електронів з атомами нейтрального газу виникає лавиноподібний процес пробою, коли за час, порівнянний з часом вільного пробігу плазмових електронів при непружних зіткненнях, відбувається практично повне вигорання нейтрального газу. При цьому щільність плазми на 2–4 порядки перевищує щільність електронів пучка. Температура електронів плазми стає дуже високою: вона може досягати 10–100 еВ, а у випадку сильнострумівого пучка – кеВ і десятки кеВ.

Теорія, що розглядає ППР як плазмово-пучковий пробій газу, базується на рівняннях балансу частинок і балансу енергій.

Така модель пояснює основні закономірності ППР, які спостерігаються при експерименті: залежність умов запалювання від тиску газу і зрив розряду при деякому критичному тиску  $P_{кр}$  через дифузію та рекомбінацію. Проте така модель лишає осторонь питання про енергетичні перетворення в ППР, про механізм передачі енергії від пучка до плазми.

Другий підхід розглядає розвиток ППР з пучкової нестійкості, що виникає при проходженні пучка заряджених частинок через плазму. Сутність цього явища [8] складається в збудженні в плазмі електромагнітних хвиль при проходженні через неї пучка швидких заряджених частинок. Механізм збудження ППР в цьому випадку можна уявити так: при визначених параметрах пучка і тиску нейтрального газу в області взаємодії концентрація плазми, що утворена за рахунок прямих зіткнень електронів пучка з нейтральним газом, досягає значень, близьких до концентрації електронів в пучку. При цьому пучок стягується в шнур, і створюються умови для розвитку пучкової нестійкості на подовжніх плазмових коливаннях та поверхневих хвилях. За рахунок електричних полів цих коливань здійснюється додаткова ефективна іонізація газу, і тому утворюється плазма з концентрацією більшою, ніж концентрація електронного пучка. Далі ППР підтримується за рахунок кінетичної енергії електронів, що потрапляють в область взаємодії. В цьому підході пучок, внаслідок дії кулонівських сил тяжіння, збуджує в плазмі інтенсивні ленгмюровські коливання і за допомогою беззіткнюючого механізму передає їм (і плазмі) енергію.

Жодний з підходів опису ППР не вирішує питання передачі енергії від плазмових хвиль до електронів плазми. Факт сильного розігріву електронів плазми поки не знайшов пояснення. Основна проблема складається в тому, що фазові швидкості хвиль порівнянні зі швидкістю пучка й, отже, значно більше теплової швидкості електронів плазми.

Існуючі теорії також не можуть пояснити, чому за певних умов пучок на збудження ППР втрачає дуже мало енергії (до 10 %).

Важливою особливістю ППР, що відрізняє його від інших ВЧ і НВЧ-розрядів, є те, що він викликаний не дією ВЧ та НВЧ-полів, створених зовнішніми джерелами ВЧ і НВЧ-хвиль, тому відпадає дуже важка задача проникнення електромагнітного поля в плазму скільки-небудь значної щільності або в плазму, що займає великий обсяг.

Для ППР характерні великі струми прискорених іонів, порівняні зі струмами електронних пучків як у радіальному, так і в осьовому напрямках розряду, а також інтенсивні потоки електронів, прискорених до енергій, що набагато перевищують енергію електронного пучка, тому ППР може бути використаний як дуже ефективне джерело іонів та прискорювач електронів.

Пучково-плазмова взаємодія призводить до розширення енергетичного спектра пучка електронів. Для зменшення цього ефекта необхідно скоротити загальний подовжній розмір анодної плазми і довжину зони ефективної взаємодії пучка електронів із прощарком плазми, зверненим до катода.

Виникнення пучково-плазмової нестійкості та нагрів електронів плазми буде відбуватися за умови  $[\omega_e(n_b/n_e)]^{1/3} > Z_a$ , де  $\omega_e = (e^2 n_e / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$  – електронна ленгмюровська частота;  $Z_a$  – частота зіткнень електронів з атомами газу. Частоту іонізації плазмовими електронами можна оцінити з виразу  $Z_n = (j_{en}/e) d_n p_{a0} Q_{e0n}$ , де  $j_{en} \approx 1/4 (en_e)(8kT_e/\pi m_e)^{0.5}$  – щільність струму термічних електронів плазми;  $Q_{e0n} \approx n_0 \alpha_i (U_i + 2kT_e/e) \exp(-eU_i/kT_e)$  – усереднюючий перетин іонізації термічними електронами анодної плазми;  $n_0$  – число Лошмідта;  $\alpha_i$  – емпірична стала перетину іонізації газу. Середня термічна енергія електронів плазми оцінюється з рівняння балансу енергії для пучково-плазмової системи [6].

За певних умов розігрів електронів може призвести до такої іонізації газу, що цілком буде компенсувати витрати заряджених часток і підтримувати на заданому рівні струм розряду, – виникає пучково-плазмовий розряд [6]. Якісно він являє собою високочастотний пробій газу, що розвивається в такий спосіб. Електронний пучок, проходячи через газ, створює плазму з щільністю, порівняну з щільністю електронів пучка. Через те, що система “електронний пучок – плазма нерівноважна”, теплові електромагнітні шуми плазми, що мають фазову швидкість порядку швидкості пучка електронів, починають посилюватися, поглинаючи енергію пучка. Електрони пучка розкачують подовжні та поверхневі хвилі, електричні поля яких розігрівають електрони до енергій, достатніх для іонізації газу. Ріст концентрації заряджених часток призводить до підвищення ефективності колективної взаємодії пучка з плазмою, росту високочастотних електричних полів і т. д. Концентрація плазми різко зростає приблизно в два-три рази, і система переходить в режим пучково-плазмового розряду з максимальним значенням амплітуди коливання та визначеною температурою електронів, що потім підтримуються за рахунок кінетичної енергії електронів пучка, що пронизує плазму. При утворенні іонно-компенсованого електронного пучка утворюється плазмовий циліндр, що виконує роль плазмового хвилеводу, по якому поширюються об’ємні та поверхневі хвилі. Комбінація цих коливань в обмеженій пучково-плазмовій системі дає широкий спектр частот, у тому числі і порівняно низькочастотний, який залежить від геометричних розмірів системи. Частина енергії коливань може по ланцюгах живлення та керування вийти з пучково-плазмової системи, порушуючи електричну міцність елементів зовнішнього ланцюга і створюючи перешкоди.

Пучково-плазмовий розряд існує в широкому діапазоні струмів, тисків, прискорюючих напруг в електричних і магнітних полях різноманітної конфігурації [2]. Для його існування необхідно забезпечити визначене співвідношення між щільністю електронів плазми і пучка  $n_e/n_b \geq 10^1 \div 10^5$ , тиск газу  $10^{-3} \div 10$  Па, прискорюючу напругу ( $U \geq 10^2 \div 10^5$  В), струм пучка  $10^{-3} \div 10$  А. При зміні тиску спочатку спостерігається стадія іонного фокусування пучка  $n_e > n_b$ , потім утворюється плазма  $n_b \approx n_e$ , запалюється пучково-плазмовий розряд  $n_b \ll n_e$ , який при подальшому підвищенні тиску може згаснути через збільшення кількості зіткнень електронів плазми з атомами газу.

Чим ширше енергетичний спектр електронного пучка, тим ширше спектр збуджуваних ним коливань у плазмі. Проте звичайно спектр коливань пучка електронів близький до монохроматичного, тому що при прямуванні його в плазмі відбувається фазове фокусування електронів, утворення згустків, що і збуджують в плазмі змінне самоузгоджене електричне подовжнє поле. Інтенсивність цього високочастотного поля уздовж шляху поширення пучка спочатку наростає, стає максимальною на деякій відстані від площини інжекції електронів у плазму, а потім зменшується до деякого рівня. Це пов’язано з тим, що при поширенні пучка в плазмі змінюється його енергія та параметри плазми, система виходить із синхронізму і пучково-плазмова взаємодія зменшується. При цьому спектр збуджуваних у плазмі коливань розширюється.

Частота збуджуваних коливань лежить у діапазоні  $10^{-1} \div 40$  МГц і приблизно відповідає електронній плазмовій частоті  $\omega_e$ . Без зовнішньої модуляції коливань ширина спектра  $\Delta\omega \approx \omega_{cp}/3$ , де  $\omega_{cp}$  – середня по спектру частота коливань. Зовнішньою модуляцією пучка або подачею високочастотного поля на плазму можна керувати за допомогою розвитку пучково-плазмового розряду. Такий вплив призводить до звуження спектра коливань і заглушення низькочастотної частини спектра.

З багатьох резонансних частот, на яких можуть збуджуватися коливання в плазмі, основними, як уже відзначалося, будуть плазмові електронні та іонні частоти. При взаємодії електронного пучка з поверхневою хвилею плазмового циліндра частота збуджуваних коливань у відсутності магнітного поля обмежена зверху розміром  $\omega \leq \omega_e/(1 + \varepsilon)^{1/2}$  [6], де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища, що оточує плазмовий хвилевід. Зниження частоти плазмових коливань може бути пов'язане з впливом радіальних осциляцій заряджених часток і радіальних електричних полів у плазмі [7]. При умовах  $k_z r < 1$  та  $\omega < v_e/r_0$ , де  $k_z$  – подовжнє хвильове число;  $r_0$  – радіус плазми;  $v_e$  – теплова швидкість електронів плазми, відбувається зниження частоти коливань, що пов'язане зі зменшенням поперечної провідності плазми через осциляції електронів. При цьому може відбуватися стабілізація пучкової нестійкості. Для плазми в металевій трубі умови поперечної осциляції електронів забезпечуються приелектродним падінням потенціалу.

Слід також відзначити, що для просторово обмеженої плазми існує "геометричний" високочастотний резонанс, пов'язаний з наявністю на її межі прошарку просторового заряду і ємності плазма – анод. Він лежить у діапазоні  $\omega_l \ll \omega \ll \omega_e$  та дорівнює  $\omega = \omega_e(Rd_{an}/d_n)$ , де  $d_{an}$  – відстань плазма – анод;  $d_n$  – подовжній розмір плазми;  $R \approx 1$  – коефіцієнт просторового розподілу часток плазми. Низькочастотні коливання в плазмі утворюються за рахунок розпадної нестійкості або нелінійного зміщення високочастотних хвиль [7].

Аналіз умов прояву пучково-плазмової взаємодії та пучково-плазмового розряду показує, що у високовольтному тліючому розряді (ВТР) в більшості випадків ці умови виконуються. Коефіцієнт трансформації енергії пучка може складати порядку одиниць відсотків, що цілком достатньо для підтримки високочастотної іонізації газу в анодній плазмі. Наприклад, для високочастотного пробою газу при тиску  $\sim 5$  Па необхідно поле з  $E \approx (10 \div 100)$  В/см. Такі електричні поля виявляються на поверхні плазмових емітерів іонів [6] й в інших пучково-плазмових системах. Таким чином, властивості плазми, що утворюються при пучково-плазмовому розряді, багато в чому аналогічні властивостям анодної плазми ВТР. Оскільки для ВТР процеси пучково-плазмової взаємодії в даний час вивчені недостатньо, то про ефективність колективних механізмів можна судити побічно за вимірами температури електронів, із калориметричних вимірів потужності, внесеної в плазму електронним пучком, і за розбросом швидкостей електронів пучка на виході.

Анодна плазма ВТР аналогічна в якійсь мірі тліючому світінню. В ній спостерігається великий градієнт наростання концентрації електронів з боку катода і порівняно висока однорідність розподілу їхньої щільності за об'ємом. Це можна пояснити локальним плазмовим резонансом, область якого розташована недалеко від площини інжекції електронів у плазму, й однорідним розподілом подовжніх і поверхневих високочастотних хвиль по її об'єму, що пронизується електронним пучком. При вході в плазму електрони втрачають на пучково-плазмову взаємодію  $\sim 0,01 W_e$  та енергетичний спектр їх розширюється. При подальшому прямуванні швидкість електронів і фазова швидкість хвилі виходять з синхронізму й інтенсивність передачі енергії пучка плазми різко зменшується.

Особливостями пучково-плазмової взаємодії у ВТР є великий розкид електронів катода по швидкостях, що значно зростає через зіткнення з атомами газу, порівняно мала щільність потоку електронів і висока їх швидкість, мала концентрація електронів в анодній плазмі, її неоднорідність та обмежений подовжній розмір. Ці чинники зменшують ефективність взаємодії та дозволяють без істотних витрат транспортувати електрони до оброблюваної поверхні. Високочастотні поля пучково-плазмового розряду можуть стабілізувати довгохвильові, наприклад, іонізаційні-перегрівні нестійкості плазми, але призводять до росту втрат через короткохвильові нестійкості, нагрівання часток плазми та дифузії. Також при цьому в ВТР спостерігаються мікропробой, обмеженість і складна форма об'єму, що займається плазмою, мала щільність струму та висока швидкість електронів пучка.

Встановлено, що пучково-плазмова взаємодія в ВТР обумовлює неоднорідність плазми та складну форму її емітуємої поверхні, іонно-оптичну нестійкість та пробій проміжку катод – плазма, тому для підвищення стабільності роботи ДЕЛ ВТР необхідно керувати умовами пучково-плазмової взаємодії як в самостійних, так і в несамостійних ВТР.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Гусева Л.Г. Влияние отдельных элементарных процессов на характеристики высоковольтной формы разрядов // Изв. АН СССР. Сер. Физика. – 1964. – Т. 28. – № 1. – С. 141–146.
2. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
3. Коваленко В.П. Электронные сгустки в нелинейном коллективном взаимодействии пучков // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139. – Вып. 2. – С. 223–263.
4. Корнилов Е.А., Ковтик О.Ф., Файнберг Я.Б., Харченко И.Ф. Теория пучково-плазменного разряда // Журнал теоретической физики. – 1965. – Т. 35. – С. 1378–1385.
5. Лебедев Л.М., Опищенко И.Н., Ткач Ю.В., Файнберг Я.Б., Шевченко В.И. Теория пучково-плазменного разряда // Физика плазмы. – 1976. – Т. 2. – Вып. 3. – С. 407–413.
6. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
7. Файнберг Я.Б. Некоторые вопросы плазменной электроники // Физика плазмы. – 1985. – Т. 11. – № 11. – С. 1398–1403.
8. Файнберг Я.Б., Ахизер А.И. О взаимодействии заряженных частиц с электронной плазмой // ДАН СССР. – 1969. – Т. 69. – С. 555–561.

ЄВЕНКО Андрій Васильович – студент 4-го курсу Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- розробка потужних прискорювачів та сильноточових високовольтних комутаторів;
- радіолокація;
- фізика та техніка прискорювачів;
- системи радіонавігації.

КОТИК Олександр Валерійович – магістр електроніки, аспірант Вінницького державного технічного університету, молодший науковий співробітник кафедри мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- пучково-плазмові процеси в електронно-променевої апаратурі промислового застосування;
- плазмова електроніка;
- розробка електронно-променевої апаратури для технології;
- нанесення різноманітних функціональних покриттів;
- генерування НВЧ-коливань;
- прискорювальна техніка;
- системи керування технологічними джерелами електронів.

НОВИКОВ Анатолій Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- вакуумна та газорозрядна електроніка;
- електронно-променева технологія та технологічні електронні гармати;
- прилади та обладнання для отримання та використання плазми;
- джерела електронів високовольтного тліючого розряду;
- дослідження кульової блискавки.