

УДК 681.518, 533.9.15, 533.932

О.В. Шефер

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ, ЯК ЗАПОРУКА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті розглянуто сучасний стан та інноваційне бачення фізичних процесів котрі відбуваються в електричних розрядах, що жевріють, які безпосередньо пов'язані зі складними радіонавігаційними системами. Умови створення та новітні характеристики плазми від'ємного випромінювання, в процесі взаємодії зарядносіїв робочого газу, елементів систем радіонавігації.

Ключові слова: радіонавігаційна система, електричний розряд, плазма, від'ємне випромінювання, зарядносії, іонізація, нормальний режим, слобоаномальний режим.

Вступ

Проходження електричного струму в газах пов'язано з утворенням плазми, котра використовується для функціонування елементів радіонавігаційних систем. Фундаментальні праці відомих науковців [1-4] присвячені дослідженням фізичних процесів, котрі протікають у плазмі газового розряду. Згідно досліджень [5], стан газорозрядної плазми, визначається кінетикою електронів та іонів. В свою чергу кінетика зарядносіїв [6], залежить, як від взаємодії між зарядами та нейтральними частинками, так і від взаємодії зарядів із обмежувачими поверхнями.

Однією з найважливіших взаємодій зарядносіїв із нейтральними частинками є об'ємна іонізація (α - процеси), котра необхідна для підтримання стаціонарного стану плазми та електричної провідності газу елементів радіонавігаційних систем.

Мета статті: Розгляд фізичних процесів, котрі протікають в електричних розрядах, що жевріють, із метою створення довговічних, високонадійних та якісних елементів радіонавігаційних систем [17]. Аналіз закономірностей зміни властивостей зарядносіїв електричного розряду, для формування підходів та методів покращення якості функціонування радіонавігаційних систем в цілому.

Основна частина

Класичне дослідження процесу іонізації [7] призвело до створення універсального виразу, за яким легко визначити коефіцієнт іонізації α/p . Проте в неоднорідних електричних полях визначення коефіцієнту іонізації α/p , у відповідності з дослідженнями авторів [8], є неточним. Для подальших досліджень автори [9] для розрахунку α/p використовували експериментально ефективний поперечний переріз іонізації Q_i . Розрахунок із урахуванням Q_i дає такий α/p , котрий має цілком задовільне узгодження з експериментальним значенням α/p .

Суттєвим та принципово важливим процесом виробництва зарядносіїв в газовому розряді є вторинна електронна емісія на катоді під дією бомбардування його позитивними іонами (γ_i -процеси), нейтральними частинками (γ_n - процеси) та фотонами (γ_p - процеси). Ґрунтовні дослідження [10], встановили, що до енергії позитивного іона $\epsilon_i = 600$ еВ вторинна електронна емісія на катоді обумовлена потенціальною енергією іона. Як наслідок, в указаному діапазоні енергії іона, значення коефіцієнта γ можна вважати постійним $\gamma = \text{const}$. Відносно внеску фотоефекта в γ -процеси на катоді, дослідження [11] показують, що в нормальному та слобоаномальному режимі розряду, що жевріє, випромінювання з плазми від'ємного світіння не суттєво впливає на γ -процеси.

Розряд, що жевріє - самостійний електричний розряд у газі з холодними плоскопаралельними електродами із тиском ($10^{-3} - 15$) кПа робочого газу та розрядному струмові в інтервалі ($10^{-5} - 1$) А, як показано на рис. 1.

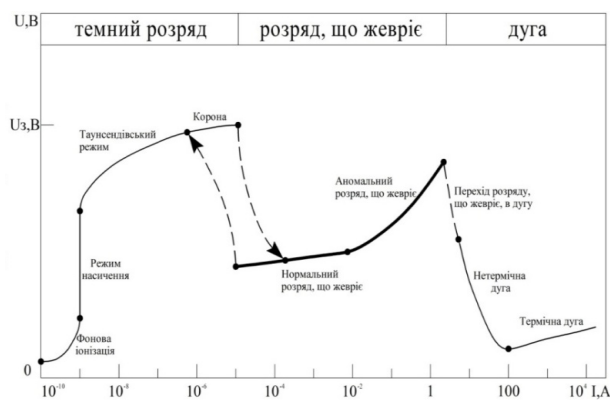


Рис. 1. Електричний розряд у газах

Якщо анод наближений до від'ємного випромінювання, то розряд, що жевріє, може стійко горіти без позитивного стовпа (короткий розряд, що жевріє). Подальший розгляд питань, буде відноситись тільки

до короткого розряду, що жевріє. В цьому розряді всі зони, розташовані між катодом та анодом, та на поверхні катода, є основними та відіграють важливу роль в підтримці розряду складних радіонавігаційних систем. Автори [5] відмічають, що значна величина катодного падіння потенціалу, за порівняно невеликих струмів, у розряді, що жевріє, створює у катодних зонах велику швидкість руху зарядносіїв. Наслідком цього є те, що в основній частині розряду (темному кружковому просторі) переважним є направлений рух електронів та позитивних іонів.

У результаті бомбардування поверхні катода іонами, швидкими атомами та внаслідок фотоефекта, створюється вторинна емісія електронів (γ -процеси). Електрони, що отримують прискорення в сильному неоднорідному електричному полі, набирають велику кінетичну енергію в напрямку анода. При зіткненні з нейтральними атомами прискорені електрони виконують процес іонізації (α -процеси). Нові електрони, створені в процесі іонізації, знову набирають швидкість в електричному полі та здійснюють іонізацію. Позитивно заряджені іони, що утворилися в процесі іонізації, прискорюючись у електричному полі, прямують до катода, потрапляють на його поверхню, що викликає емісію нових електронів. Електрони, що взаємодіють із сильним неоднорідним електричним полем набувають велику кінетичну енергію, котру вони частково витрачають у просторі падіння потенціалу та, повністю, у від'ємному світінні на іонізацію та збудження нейтральних атомів. У стаціонарному режимі розряду кожен електрон, що імітується із катода виробляє стільки актів іонізації та збудження, що в результаті бомбардування катода іонами, атомами та фотонами виникає новий електрон із катода. Цей процес задовольняє умові стаціонарності розряду [1].

$$\gamma (\exp(\alpha d) - 1) = 1, \quad (1)$$

де d – товщина темного кружкового простору.

Наведений механізм елементарних процесів спостерігається в розрядному проміжку, утвореному плоскопаралельним анодом та катодом, що являє собою звичайну геометрію розрядного пристрою. На вказаній геометрії розрядного проміжку отримано певний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, викладених у [4, 8, 11, 12]. На підґрунті цих результатів структура розряду, що жевріє, відображається так, як на рис. 2.

Безпосередньо із катодом межує астановий темний простір. У цьому просторі щойно зімітовані електрони мають малі швидкості, а їх енергія складає не більше одного електрон-вольту; її недостатньо для збудження газу. В наслідок чого цей простір представляється темним. Подальший рух електронів прискорюється в сильному електричному полі та вони набувають енергію для збудження нейтральних атомів газу. Тому за астановим темним простором утворюється сяюча область невеликої ширини, у

вигляді сяючої півки. Тут енергія електронів наближається до максимуму функції збудження.

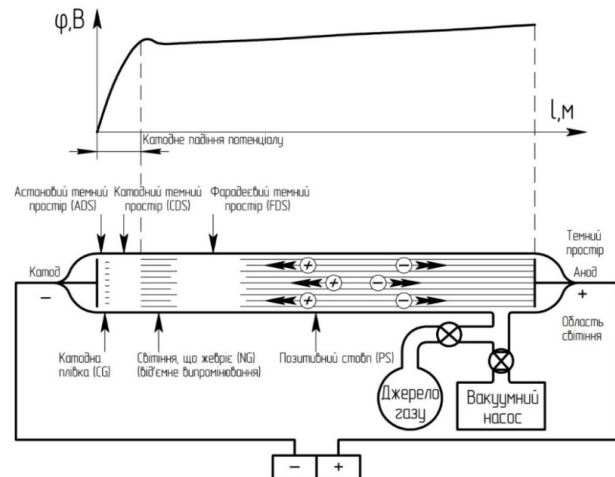


Рис. 2. Структура розряду, що жевріє

Наступною зоною від катода є темний кружковий простір, де електрони під час взаємодії з електричним полем набувають велику кінетичну енергію, оскільки в цій зоні напруженість електричного поля значно вище, ніж в інших зонах розряду. Завдяки енергії електронів, що є значно вищою максимуму функції збудження, світіння цієї області суттєво слабше. Порівняно зі збудженням газу процеси іонізації тут більш інтенсивні. Кожен електрон, що проходить цей простір, при середній аномальності розряду, здійснює два-три акти іонізації. Енергія електронів у кінці цієї області велика та наближено дорівнює eU_k . Швидкість руху іонів суттєво менша, ніж електронів, через процеси резонансного перезарядження, в котрих вони приймають участь у процесі руху до катода. В темному кружковому просторі створюється великий об'ємний заряд позитивних іонів. Як наслідок, розподіл електричного поля $E(x)$ в цій частині розряду є суперпозицією поля заряджених електродів та поля об'ємного заряду. Експериментальний розподіл $E(x)$ в цій області отримано в [13], за допомогою електронного пучка, що перетинає розряд в площині, перпендикулярній осі розряду.

Від'ємне випромінювання, що жевріє, межує із темним кружковим простором, має різкий кордон із боку катода. Однак інтенсивність випромінювання від катодної до анодної межі від'ємного випромінювання поступово спадає. Згідно з [13], напруженість електричного поля цієї області не тільки мала, але й має від'ємний знак. В цій зоні одночасно відбувається три важливих процеси:

- іонізація газу під дією електронів, що надійшли від темного кружкового простору;
- збудження газу електронами, у котрих енергія значно менша енергії іонізації;
- рекомбінація електронів із позитивними іонами.

Наступною зоною короткого розряду, що жевріє, є темний простір. На відміну від кружкового тем-

ного простору вона характеризується відносно малою енергією електронів та іонів. Енергія електронів, у цій зоні, значно менше максимальної функції збудження, внаслідок цього дана область є темною. В бік аноду електрони переміщуються, в основному, хаотично під дією сил дифузії. Від'ємне випромінювання являє собою майже вільну від електричного поля квазінейтральну плазму, що ізольована від катода просторовим зарядом позитивних іонів. Це світіння є найбільш яскравим, у порівнянні з усіма зонами розряду, що жевріє, хоча за своїми розмірам воно значно менше позитивного стовпа. Про плазму від'ємного випромінювання є ціла низка відомостей, що отримані за допомогою зондових, оптичних, мікрохвильових та математичних методів, зокрема, найбільше дослідів проведено з плазмою інертних газів.

Для визначення фізичного стану плазми в дослідженнях визначається концентрація електронів N_e та їх середня енергія $\bar{\epsilon}_e$, потенціал простору V_{p1} , функція розподілу електронів за енергіями $f(\epsilon)$ та розподіл атомів газу за збудженими станами. У [16] отримано розподіл густини електронів $N_e(x)$ уздовж від'ємного випромінювання, де встановлено, що в катодній частині цієї зони є невеликий надлишок позитивних іонів $N_i > N_e$, а в анодній частині, навпаки, $N_e > N_i$. У наслідок цього створюється слабе електричне поле в темному круковому просторі. Встановлено, що первинні електрони, котрі приходять з боку катода, у від'ємному світінні, всупереч результатам [14], створюють не одне непружне зіткнення, а кілька, та їх пробіг, l , як наслідок, протяжність випромінювання L рівна кільком довжинам вільного пробігу електрона.

Зондові дослідження авторів [15] встановили, що у від'ємному світінні крім швидких первинних електронів мають місце вторинні електрони з концентрацією $N_e = 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ та енергією 3 – 8 eV та кінцеві теплові електрони з $N_e = 10^{-10} - 10^{-11} \text{ см}^{-3}$ та енергією 0,5 - 2,5 eV. Вторинні та кінцеві електрони мають максвелівський розподіл електронів за енергіями $f_m(\epsilon)$. Поглиблені результати зондових вимірів представлені в [15], котрі були проведені при 100 Па гелія в розрядній трубці діаметром $2,7 \cdot 10^{-3}$ м із Мо-катодом методом другої похідної зондового струму за напругою. Виміряно щільність електронів N_e , їх середня енергія $\bar{\epsilon}_e$, потенціал простору V_{p1} та функція розподілу $f(\epsilon)$. В цій функції розподілу встановлений, порівняно з максвелівським розподілом $f_m(\epsilon)$, надлишок швидких електронів, створених первинними електронами в непружних зіткненнях з нейтральними частками газу. Встановлено, що N_e має максимум в катодній частині від'ємного випромінювання, котрий плавно зменшується в бік анодної межі. Згідно з [16], за результатами зондових досліджень та НВЧ – випромінюванню, отримано низький рівень шумів плазми в цій зоні, обумовлений малою середньою енергією кінцевих електронів

($\epsilon_e = 0,3 - 2,0$ eV). Указана властивість плазми знайшла практичне застосування в елементах електронних пристроїв систем радіонавігації.

За рахунок енергії первинних електронів, що надходять із темного крукового простору, у від'ємному світінні протікають інтенсивні процеси іонізації та збудження нейтральних атомів і молекул газу. На відміну від плазми позитивного стовпа, процеси збудження в даній плазмі обумовлені, як прямим електронним ударом, так і випромінюванням, що виникає в рекомбінаційних процесах, згідно [15]. Роль рекомбінації зростає з віддаленням від катодного кордону світіння та збільшенням тиску газу. Оскільки напруженість електронного поля та довжина пробігу електрона $\bar{\lambda}_e$ менша поперечних розмірів камери D ($\bar{\lambda}_e < D$), то

теплові електрони визначають амбіполярну дифузію зарядів до стінок розрядної камери та рекомбінацію електронів та іонів в об'ємі газу. Наявність інтенсивних процесів амбіполярної дифузії підтверджує, що навпроти від'ємного випромінювання, температура стінок газорозрядної трубки максимальна, згідно зі [3]. Однак наявність швидких електронів із невеликим, але широким максимумом свідчить про те, що функція розподілу електронів за енергіями в плазмі від'ємного випромінювання не є максвелівською, і, як наслідок, має досить складний характер. Утворення нових розрядів квантів та створення плазми у від'ємному випромінюванні відбувається виключно в процесі взаємодії первинних електронів із нейтральними частинами робочого газу. Концентрація електронів N_e та іонів N_i не зростає до великих значень, оскільки вона обмежується наступними зворотними процесами, в котрих відбуваються втрати електронів та іонів. Дифузія іонів у темний круковий простір та дифузія електронів у темний фарадєєвий простір. Зарядоносії, приймаючи участь у цій дифузії, та є безпосередніми провідниками електричного струму.

Амбіполярна дифузія електронів та іонів на стінки розрядної трубки. Цей процес не сприяє переносу електричних зарядів між електродами і є суттєвою причиною втрат та збурень у плазмі від'ємного випромінювання. Об'ємна рекомбінація електронів та іонів, в якій відбувається виділення енергії у вигляді випромінювання.

Концентрація збуджених атомів обмежена, оскільки тут можливі такі спустошливі процеси, як каскадні переходи, удари другого роду, зіткнення збуджених атомів зі стінками розрядної камери та ступінчаста іонізація. У джерелах [9, 11], досліджено вплив плазми на інші зони розряду та встановлено, що плазма від'ємного випромінювання має вплив на виникнення вторинної електронної емісії на катоді.

Висновки

У рамках статті був проведений детальний розгляд факторів, котрі впливають на підвищення якості функціонування радіонавігаційних систем. У

результаті виконаної роботи по аналізу елементарних процесів, котрі відбуваються в розряді, що жевріє, видно, що не всі описані процеси відіграють суттєву роль у катодній області. Для нормального та слабоаномального розряду, що жевріє, згідно із вище наведеними дослідженнями, визначальними процесами в розглянутій області є:

1. Виробництво зарядоносіїв у просторі падіння за умови низького та середнього катодного падіння потенціалу здійснюється за рахунок іонізації атомів газу електронами.

2. Рух електронів в темному кружковому просторі, за винятком області, що безпосередньо межує з катодом, за умови нормального та слабоаномального катодного падіння, можна вважати дрейфовим та направленим рухом, а у високому катодному падінні - повністю направленим рухом.

3. Опір під час свого руху електрони зустрічаються в основному через непружні удари з нейтральними частинами газу в процесах збудження та іонізації.

4. Рух іонів в просторі падіння потенціалу протікає іншим чином, ніж у електронів. Іони проходять кружковий темний простір в напрямку зростаючого електричного поля, при взаємодії із яким повільніше набувають прискорення, ніж електрони. Крім того, пружний поперечний переріз та втрати енергії іонів при цьому мають більше значення, ніж у електронів. Непружні втрати енергії іонів у процесі збудження та іонізації дуже малі, крім сильноаномального розряду. Зокрема, гальмування руху іонів в основному проходить в процесі перезарядження, що є важливим процесом між іоном та нейтральною газовою частинкою.

Для отримання повної реальної фізичної картини елементарних процесів та уточнення теорії розряду, що жевріє, необхідні подальші дослідження.

Актуально постає задача розробки нових методів та підходів щодо удосконалення існуючих та розроблення перспективних елементів радіонавігаційних систем [17].

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА, КАК ЗАЛОГ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.В. Шефер

В статье рассмотрено современное состояние и инновационное видение физических процессов происходящих в электрических тлеющих разрядах, которые непосредственно связаны с радионавигационными системами. Условия создания и новейшие характеристики плазмы отрицательного излучения, в процессе взаимодействия зарядоносителей рабочего газа элементов систем радионавигации.

Ключевые слова: радионавигационная система, электрический разряд, плазма, отрицательное излучение, зарядоносители, ионизация, нормальный режим, слабоаномальный режим.

ANALYSIS OF ELECTRIC DISCHARGE PROPERTIES VARIATION MECHANISM AS AN IMPROVING KEY OF RADIO NAVIGATIONAL SYSTEMS QUALITY

O.V. Shefer

The article examines the current state and innovative view of the physical processes taking place in glowing electric discharges that directly connected with complex radio navigational system, terms of creating and new characteristics of negative radiation plasma during interaction of working gas charge carriers in elements of navigation.

Keywords: radio navigational system, electrical discharge plasma, negative radiation, charge carriers, ionization, normal mode, low abnormality mode.

Список літератури

1. Энгель А. Ионизованные газы: Пер. с англ. / Под ред. Иоффе М. С. М., Физматгиз, 1959. – 332 с.
2. Smirnov Boris M. *Theory of Gas Discharge Plasma. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland.* – 2015. – P 423.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т.1 / Под ред. В. Е. Фортнова. – М.: Наука, 2000. – 633 с.
4. Hantzsche E. *Space charges sheaths with electron emission// Proc. 21 EPS Conf. Contr. Plasma Phys., Montpellier, 1994. Pt. II, p. 926- 929.*
5. Каган Ю. М., Перель В. И. – Доклады Академии Наук СССР, 1956, 108, №2, с. 222 – 225.
6. Auer P.L., Hurwitz H. Jr., Tamor S., *Theory of the cathode sheath in a low-density gas discharge. II Phys. Rev. vol. 111, A 4, 1958, p. 1017-1028.*
7. Townsend J. S. *Theory of Ionization of Gases by Collision (Classic Reprint), London Constable & Company Ltd - Gerstein – University of Toronto.* 2015. – 112 p
8. Weizel W., Rompe R. *Theorie der elektrischen Lichtbögen und Funken. - Leipzig, 1949, 340 S.*
9. Badareu E., Popescu I., Iova I. *Vorgänge in den Kathodenteilen von anomalen Glimmladungen in Helium. - Rev. Phys. Acad. RPR, 1960, v.5, N 3-4, p. 287-293.*
10. P. Mahadevan, J. K. Layton, and D. B. Medved – *Phys. Rev.* 129, 79, 1963.
11. Hantzsche E. *A hydrodynamic model of vacuum arc plasmas. IEEE Trans. Plasma Sci., 1992, v. 20, № 1, pp. 34-41.*
12. Клярфельд В. Н., Гусева Л. Г., Покровская – Соболева А. С. – *Журнал технической физики, 1966, т. 36, с. 704 – 713.*
13. Warren R. *Phys. Rev.* 1955. Vol. 98. N 6. P. 1650– 1658.
14. Muller K., Tenschert F. *z. f. Physik, 1964, 178, N3, p. 319.*
15. В. И. Демидов, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев. *Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы, М.: Энергоатомиздат, 1996, 240 с.*
16. Anderson J. M. *Ultimate and Secondary Electron Energies in the Negative Glow of a Cold Cathode Discharge in Helium. Journal of Applied Physics, 1960, 31, p. 511.*
17. Кондратьев В.С. *Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков. – М: Радио и связь, 1986. –264 с.*

Надійшла до редколегії 26.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.