

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.31: 537.523.3

А.І. Кузьмичев, канд. техн. наук, В.І. Крижановський, канд. техн. наук, С.М. Дяченко

Особливості виникнення та розвитку імпульсного магнетронного розряду

Проведены исследования импульсного магнетронного разряда. Установлена физическая картина процесса его возникновения и развития, а также факторы, влияющие на него. Выявлены две фазы развития разряда – медленная слаботочная и быстрая сильноточная. Определены пути достижения высокой стабильности временных параметров возникновения и формирования разряда. Полученные результаты позволяют выбирать оптимальные режимы цепи подготовительного разряда и импульсов генератора, обеспечивающие стабильную работу электронных приборов и устройств на импульсном магнетронном разряде.

The study of pulsed magnetron discharge has been done. The physical picture of its arising and development as well as the affecting factors are established. Two phases of discharge development have been revealed – slow low-current and fast high-currents ones. Ways of achievement of high stability of time parameters of ignition and formation of such discharge are defined. The gained results allow to choose optimum regimes of a power supply circuit of the initiating discharge and of the pulse generator, providing stable work of electron devices and apparatus based on pulsed magnetron discharge.

Ключевые слова: *импульсный магнетронный разряд, возникновение разряда, вольт-амперные характеристики, подготовительный разряд, нестабильность.*

Вступ

Розряди низького тиску в схрещених магнітному та електричному полях вже досить широко використовуються в різних галузях науки і техніки. Такий розряд є різновидом тліючого розряду і виникає між двома електродами та підтримується стаціонарно, коли є на них напруга та за наявності відповідного магнітного поля. Магнітне поле скривляє траєкторії електронів та збільшує довжину їх пробігу між електродами, що призводить до збільшення зіткнень електронів з атомами та їх іонізації і, відповідно, до виникнення розряду. Виникнення розряду відбувається відповідно до горизонтальної частини характеристики $U_{\text{вин}} = f(B)$, де $U_{\text{вин}}$ – напруга виник-

нення розряду, B – індукція магнітного поля [1]. Форма та положення характеристики залежать від форми і ширини міжелектродного проміжку, тиску та природи наповнюючого газу.

Для отримання такого розряду широко застосовують як плоско-паралельні так і коаксіально-циліндричні системи типу зворотного магнетрона, в якому зовнішній електрод є катодом, а внутрішній – анодом [2–4]. Магнітне поле, поперечне електричному, створюється в міжелектродному проміжку постійним магнітом або електромагнітом. Коаксіально-циліндричні системи вельми часто використовують в установках вакуумно-плазмового нанесення покриттів, плазмового оброблення матеріалів, газорозрядних комутуючих приладах, джерелах плазми та інших [3, 4].

Останнім часом привертає велику увагу імпульсний режим роботи таких систем в вакуумно-плазмових технологіях, який дозволяє уникнути ряду негативних явищ, що мають місце в магнетронних розпилювальних системах на постійному струмі, особливо в середовищі реактивних газів (іскріння і виникнення дуг на катоді та ефект зникаючого анода внаслідок покриття електродів діелектричною плівкою [3, 4]).

Проте, незважаючи на очевидні переваги використання імпульсного магнетронного розряду, ще недостатньо вивчені його характеристики, особливо в період виникнення та формування. Метою роботи є дослідження вольт-амперних характеристик магнетронного розряду в стаціонарному та імпульсному режимах, а також часових характеристик його виникнення, з метою встановлення умов, які забезпечать стабільність імпульсного режиму, та визначення параметрів керуючих імпульсів.

1. Експериментальне обладнання та методи дослідження

Об'єктом дослідження є коаксіально-циліндрична електродна система типу зворотного магнетрона. Макет для досліджень має металокерамічне виконання, в якому для герметизації системи та ізоляції електродів використана кераміка 22ХС та її спайки з металом (мідь марки МВ) (рис. 1).

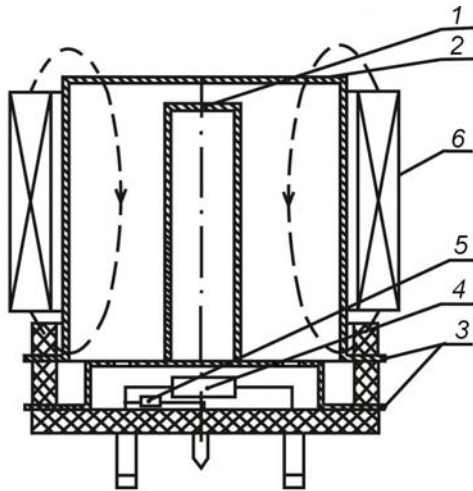


Рис. 1. Схематична конструкція електродної системи типу зворотного магнетрона

Експериментальна система містить: циліндричний анод 1 та катод 2 із немагнітної сталі Х18Н10Т, які мають мідні кільцеві виводи 3, гідрид титановий генератор 4, що забезпечує необхідний тиск водню в системі, манометр Пірані 5 з тонкого W дроту, а також кільцевий постійний магніт 6, який зовні охоплює електродну систему та створює між катодом та анодом магнітне поле, поперечне до електричного, з індукцією $B \approx 0,03$ Тл (силові лінії магнітного поля в розрядному проміжку схематично зображені на рис. 1 штрихами). Ширина міжелектродного проміжку $d = 20$ мм, вона вибрана з умови $d \leq \lambda$, де λ – довжина вільного пробігу електрона. Довжина електродів складає 60 мм. Макет виготовлено за стандартною електровакуумною технологією. Необхідний тиск водню (1...15 Па) встановлювався нагрівом генератора водню і контролювався манометром Пірані, який був відкалібрований під час виготовлення макету.

Дослідження проводились в трьох режимах виникнення та підтримки розряду: слабкострумовому стаціонарному, імпульсному, а також змішаному. На рис. 2 зображена схема дослідження для першого режиму.

Напруга джерела через обмежувальний (баластний) резистор R1 подавалась на анод і плавно підвищувалася до моменту виникнення розряду, що фіксувалось ламповим вольтметром ЛВ та міліамперметром МА. В подальшому напруга джерела збільшувалася для встановлення залежності напруги розряду від його струму.

В другому та третьому випадках дослідження проводились за схемою, яка зображена на рис. 3. Напруга подавалась на анод від генератора імпульсів, які мали форму близьку до прямокутної, протяжністю 4,5 мкс і з частотою прямокутності 200 Гц. Амплітуда імпульсів регулювалась в межах 0...3 кВ. Значення імпульсної напруги та струму в розрядному

проміжку фіксувались двохпроменевим осцилографом, який синхронізувався сигналом запуску від вихідного каскаду генератора.

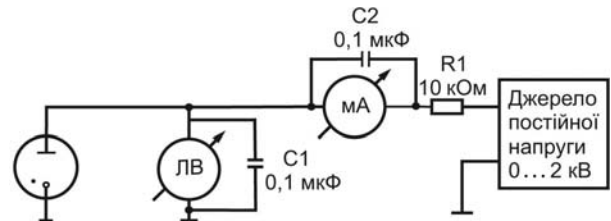


Рис. 2. Схема для досліджень статичних характеристик

Таким чином, вольт-амперні характеристики постійного слабкострумового розряду збудовані на основі показників лампового вольтметра, який фіксував падіння напруги на електродах, та міліамперметра за плавної зміни постійної напруги джерела. В імпульсному режимі відповідні характеристики будувались за даними серії осцилограм, знятих за рівних умов експерименту. З використанням таких осцилограм будувались також часові характеристики виникнення розряду. Осцилограми знімались при подачі на електроди напруги або тільки від генератора імпульсів (ключ К замкнено вліво до резистора R2; цей резистор потрібен для розряду розділового конденсатора C2), або також за наявності слабкострумового підготовчого розряду (ключ К замкнено вправо до міліамперметра, баластного резистора R1 і джерела постійної напруги). Типові осцилограми, які зняті без підготовчого розряду та за його наявності, показані на рис. 4, а та б, відповідно.

Напруга виникнення $U_{\text{вин}}$ імпульсного розряду за часом відповідає початку різкого наростання струму, а її абсолютне значення – максимуму відповідної осцилограми для напруги.

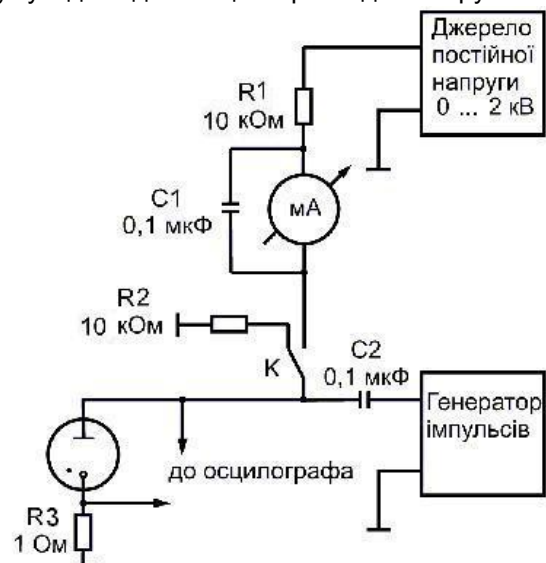


Рис. 3. Схема для досліджень характеристик розряду в імпульсному та змішаному режимах

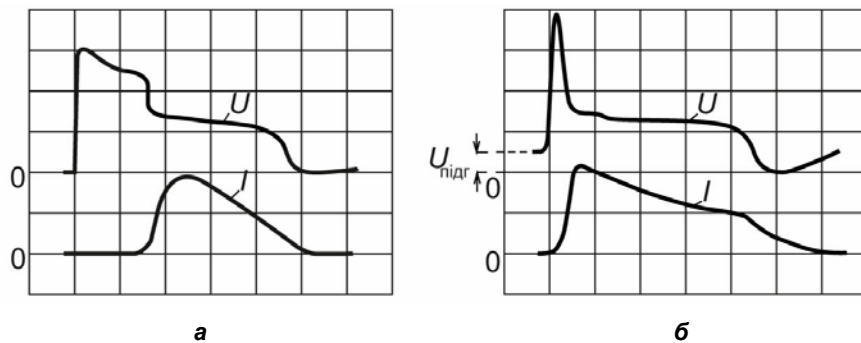


Рис. 4. Осцилограми струму та напруги на електродах макета магнетрону: а – коли немає підготовчого розряду; б – з підготовчим розрядом (його струм $I_{\text{підг}} = 30 \text{ mA}$, $U_{\text{підг}}$ – його напруга). Тиск водню $p = 12 \text{ Па}$; розгортка: 1 мкс/поділку; масштаб напруги: 500 В/поділку; масштаб струму: 2 А/поділку

2. Результати експериментів та їх обговорення

У процесі формування імпульсів струму невеликої тривалості (одиниці – десятки мікросекунд) великого значення набуває початковий період виникнення імпульсного розряду, коли накопичується необхідна концентрація заряджувальних часток. У разі малоіндуктивного ланцюга живлення тривалість переднього фронту розрядного струму визначається саме періодом формування імпульсного розряду. Як показали дослідження в цей період розрядний струм зростає від нуля або від струму підготовчого розряду до деякої рівновісної величини, яка визначається параметрами зовнішнього ланцюга (схема експерименту наведена на рис. 3, типові осцилограми – на рис. 4). При цьому напруга на розряді з початку зростає (на передньому фронті імпульсу генератора), а потім спадає до напруги його підтримки. Для виникнення імпульсного розряду, вказаної невеликої тривалості, амплітуда імпульсів напруги генератора повинна бути значно вище за напругу його підтримки.

Встановлено, що розвиток імпульсного розряду має дві фази: повільну слабкострумову і швидку сильнострумову; друга фаза настає за відповідного струму першої фази. Значення струму в процесі переходу від одної до другої фази дуже мале (десятки міліамперів) відносно амплітуди імпульсу струму, тому на осцилограмах струму, як на рис. 4, значення струму першої фази коло нуля, а передній фронт імпульсу струму і є друга фаза. Її початок – початок спаду напруги на електродах. В зв'язку з цим початок переднього фронту імпульсу струму дещо запізнюється від початку імпульсу напруги.

Коли немає підготовчого розряду таке запізнєння може досягати одиниць мікросекунд і більше (рис. 4, а) і має неупорядкований випадковий (статистичний) характер. Це запізнєння

зазвичай називають статистичним запізнюванням (затримкою) виникнення розряду. Під час подачі перших імпульсів напруги чи однократних імпульсах живлення (і відсутності підготовчого розряду) навіть можливі пропуски виникнення розряду. За наявності підготовчого розряду статистичне запізнювання мінімальне. Але при цьому в обох випадках мають місце часові флуктуації переднього фронту імпульсів струму в межах від одиниць наносекунд до долей мікросекунди. Ці флуктуації на українській мові (також і на російській) мають назву періодична нестабільність виникнення розряду; на англійській мові – jitter. Періодична нестабільність знижується за збільшення струму підготовчого розряду і тиску газу.

Встановлено, що на першій фазі розвитку імпульсного розряду за відповідного значення напруги на електродах в розрядному проміжку без підготовчого розряду виникає високовольтна (у порівнянні з напругою підтримки розряду на горизонтальній частині імпульсу) форма розряду з порівняно невеликим зростанням струму (одиниці – десятки міліампер) [5]. У разі досягнення величини цього струму критичного значення, що забезпечує критичну концентрацію зарядів, починається друга швидка фаза формування імпульсного магнетронного розряду. Критична концентрація зарядів, напевно, зв'язана з формуванням катодного шару просторового заряду і перебудовою розподілу електричного поля в міжелектродному проміжку, більш придатного до підтримки розряду.

За наявності підготовчого розряду в проміжку вже є достатня початкова концентрація зарядів і необхідний розподіл електричного поля, тому тривалість першої фази мінімальна – існує тільки на передньому фронті імпульсу напруги генератора.

Таким чином для покращення часових параметрів виникнення магнетронного розряду

необхідно прискорити процес створення в розрядному проміжку критичної концентрації зарядів. Це в деякій мірі можливо досягти скороченням тривалості високовольтного розряду та зростанням його струму до критичного значення за рахунок збільшення амплітуди імпульсу напруги генератора, яка подається на електроди (див. текст нижче). Можливо припустити, за більшої напруги зростає коефіцієнт іонно-електронної емісії [4] і кількість катодних електронів, які іонізують газ. Проте такий спосіб не вирішує до кінця зазначеної проблеми, оскільки очевидно, що за вельми високої напруги спрямляються траєкторії електронів, і вони швидко прямують на анод. Більш того, в інших експериментах було помічено, що за дуже високої напруги на електродах розвиток розряду припиняється, і він стає неможливим.

Насправді, розвиток розряду типу тліючого залежить від добутку коефіцієнтів ΓM , де Γ – інтегральний коефіцієнт іонно-електронної емісії катоду, M – інтегральний коефіцієнт розмноження іонів в проміжку біля катоду (це кількість прямуючих на катод іонів з розрахунку на один електрон, який емітований катодом) [4]. Тому зростання напруги на електродах призводить до розвитку розряду, доки зростає добуток ΓM .

В роботі [5] зазначено ряд способів створення в міжелектродному просторі необхідної допоміжної іонізації в дорозрядний період з використанням: 1) ВЧ-розряду; 2) електронного пучка або 3) підтримки між імпульсами постійного слабкострумового розряду; 4) необхідна концентрація зарядів між імпульсами може також підтримуватись без використання допоміжних джерел іонізації під час роботи на частотах десятки – сотні кГц, коли перед приходом наступного імпульсу ще не відбулася повна деіонізація

післярозрядної плазми, і концентрація заряджених часток в ній ще відповідає критичному значенню, необхідному для швидкої фази формування імпульсного магнетронного розряду.

Слід зазначити, що перші два способи є досить складними і потребують додаткового складного обладнання, а четвертий хоч і досить простий, проте може бути реалізований лише за підвищених частотах, коли тривалість паузи між імпульсами значно менша за тривалість деіонізації плазми в розрядному проміжку. Очевидно, що найбільш радикальним способом створення допоміжної іонізації є третій спосіб, з використанням малопотужного джерела, напругою 1...2 кВ, що подається через обмежувальний (баластний) резистор прямо на електроди магнетрона, між якими збуджується і підтримується слабкострумовий розряд у схрещених електричному і магнітному полях типу тліючого. Проте під час експерименту було виявлено, що наявність такого розряду за відносно малих струмів 10...25 мА не дає бажаного результату зі стабільності формування імпульсного розряду.

В зв'язку з цим були досліджені статичні (на постійному струмі) характеристики слабкострумового розряду без подачі імпульсного живлення (схему експерименту див. на рис. 2). Встановлено, що за малих струмів (одиниці і навіть десятки міліампер) вольт-амперні характеристики мають досить складну (коливальну) структуру, яка зумовлена релаксаційним характером поведінки розряду і нестабільністю падіння напруги на розряді, а, відповідно, і струму розряду (рис. 5). Цей факт є характерним для магнетронних розрядів, і він пов'язан із перебудовою областей просторового заряду в розряді при збільшенні струму [6].

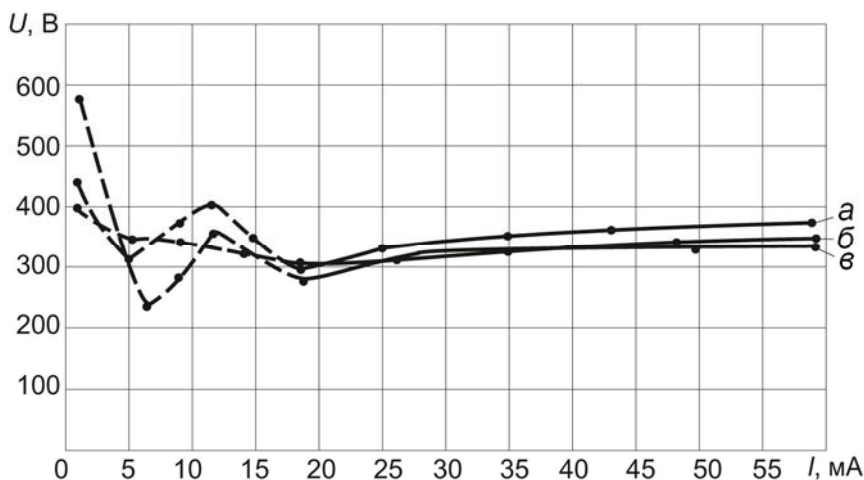


Рис. 5. Статичні (на постійному струмі) вольт-амперні характеристики для слабкострумового розряду за різного тиску водню p , Па: а – 3,5; б – 6,5; в – 12. Штрихові частини кривих мають випадковий характер і побудовані за однократним вимірюванням; за багатократних вимірювань накладання цих частин створюють області випадкових значень U та I . Суцільні криві відтворюються при повторенні експерименту

Ця нестабільність дещо зменшується з ростом тиску водню (в межах робочих тисків) та зникає за струмів десятки міліампер. Така нестабільність стаціонарного розряду при змішаному режимі сильно впливає на стабільність формування імпульсного розряду. Останнє можна пояснити нестабільним характером іонізаційних процесів в такому розряді за малих струмів, що призводить до нестабільності часу запізнювання початку наростання імпульсу струму під час подачі імпульсної напруги на електроди. Для уникнення такого явища в подальшому в експериментах струм підготовчого розряду вибирався в межах 30...40 мА. Значення такого струму лежить за межами виникнення нестабільності і забезпечує надійне виникнення імпульсного розряду з мінімальним часом запізнювання.

На рис. 6 наведені залежності напруги виникнення та підтримки імпульсного розряду від амплітуди його струму за наявності підготовчого розряду. Виникнення відповідає максимальному значенню на імпульсі напруги генератора, після якого напруга на електродах починає спадати, а струм розряду – зростати (рис. 4). Таким чином, напруга виникнення є напруга переходу від першої до другої фази формування імпульсного розряду. Тому залежність напруги виникнення від амплітуди струму тільки умовно є вольт-амперною характеристикою. Напруга підтримки розряду відповідає горизонтальній частині імпульсу напруги. Цю частину можна трактувати як квазістаціонарний розряд.

Зазначимо, що за наявності стаціонарного підготовчого розряду напруга на електродах дорівнює сумі вихідної напруги генератора та на-

пруги на конденсаторі С2, який заряджений джерелом живлення стаціонарного підготовчого розряду (рис. 3). Цей конденсатор також перезаряджається від генератора імпульсів, але аналізуючи картини розвитку розряду при частоті повторення імпульсів 200 Гц та ємності конденсатора 0,1 мкФ, допустимо не враховувати перехідні процеси, пов'язані з перезарядом С2.

На рис. 7 наведені залежності напруги та часу запізнення виникнення імпульсного розряду від крутості імпульсів генератора за наявності підготовчого розряду, які побудовані на основі серії осцилограм. Власне кажучи, ці графіки характеризують першу фазу розвитку імпульсного розряду.

Зниження часу запізнення виникнення $t_{\text{вин}}$ з ростом $U_{\text{вин}}$ і крутості імпульсів генератора S , очевидно, пов'язано з зростанням коефіцієнту іонно-електронної емісії і прискоренням накопичування зарядів в міжелектродному проміжку (див. дискусію відносно добутку ΓM).

Звертає на себе увагу досить швидко зростання напруги виникнення розряду порівняно з плавним спадом часу запізнення за збільшення крутості переднього фронту імпульсу напруги генератора. Встановлено, що з моменту досягнення часу запізнення порядку 0,2 мкс величина його зі зростанням крутості практично не змінюється, хоча напруга виникнення дещо збільшується. При цьому періодична нестабільність виникнення імпульсного магнетронного розряду досягає мінімальної величини (одниць-десятків наносекунд) і в подальшому зі зростанням амплітуди імпульсів генератора

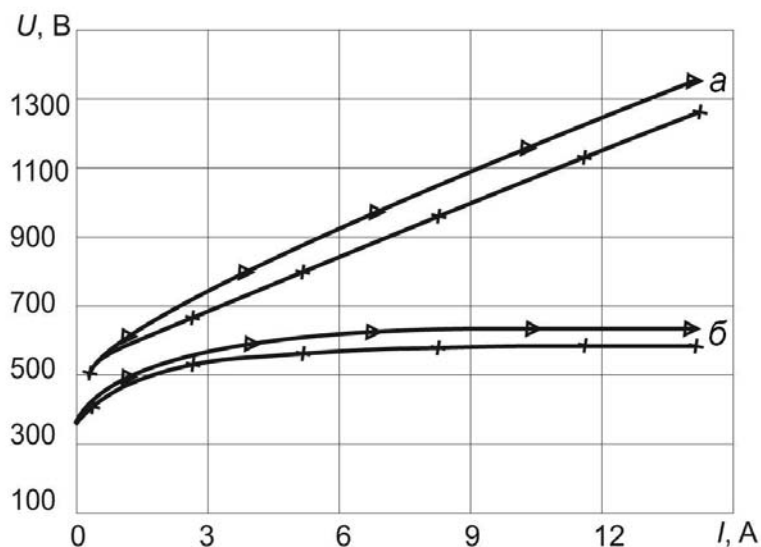


Рис. 6. Імпульсні вольт-амперні характеристики виникнення та підтримки розряду за $I_{\text{підг}} = 30$ мА; p , Па: $x - 6,5$; $\Delta - 10$; а – напруга виникнення, б – напруга підтримки розряду

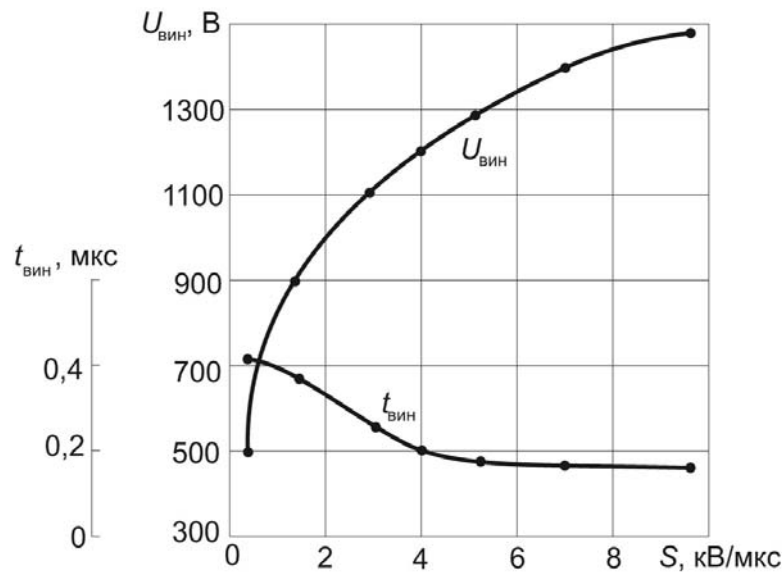


Рис. 7. Залежності напруги $U_{\text{вин}}$ та часу запізнення $t_{\text{вин}}$ виникнення розряду від крутості імпульсів генератора за $p = 12$ Па

залишається практично незмінною. Встановлений факт ще раз свідчить про те, що є межа для зниження часу запізнення виникнення магнетронного розряду за рахунок підвищення амплітуди імпульсу генератора і відповідно його крутості зростання. Останнє також підтверджує, що виникнення такого розряду відбувається за відповідної критичної концентрації зарядів в розрядному проміжку, для досягнення якої необхідний відповідний проміжок часу.

Висновки

Проведені дослідження дозволили встановити фізичну картину процесу виникнення та розвитку магнетронного розряду низького тиску та виявити основні фактори, які впливають на цей процес, а також визначити шляхи забезпечення високої стабільності його часових параметрів. Були виявлені дві фази розвитку розряду – повільна слабкострумова і швидка сильнострумова. На першій фазі розряд – високовольтний, тобто його напруга вище рівновагомї квазістаціонарної напруги підтримки розряду. На другій фазі напруга на електродах спадає до рівновагомї квазістаціонарної напруги підтримки розряду, і формується передній фронт імпульсу струму в малоіндуктивному ланцюгу. Отримані результати можуть бути використані при виборі оптимальних режимів живлення підготовчого розряду та параметрів імпульсів генератора в електронних приладах та пристроях на основі імпульсного магнетронного розряду.

Оскільки такий розряд набуває широкого застосування, бажано провести його дослідження в широкому діапазоні частот та тривалості імпульсів, а також визначити його енергетичні можливості.

Література

1. Redhead P.A. The Townsend discharge in a coaxial diode with axial magnetic field // J. Phys. – 1958. – Vol. 36. – P. 255–270.
2. Гончаров О.А., Добровольський А.М., Євсюков А.М., Проценко І.М., Літовко І.В. Новий погляд на фізику газових розрядів магнетронного типу // Український фізичний журнал. – 2009. – Т. 54, № 1–2. – С. 66–69.
3. Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И., Самокиш А.С. Современные оптические плёночные покрытия // Электроника и связь. – 2008. – № 5(46). – С. 5–20.
4. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. – К.: Аверс, 2008. – 168 с.
5. Денбновецкий С.В., Хипплер Р., Кузьмичёв А.И., Куликовский В.Ю., Нисимов С.У., Сидоренко С.Б. Запаздывание возникновения разряда в импульсных магнетронных распылительных устройствах // Электроника и связь. – 2000. – № 8, т. 2. – С. 195–198.
6. Кузьмичёв А.И., Шендаков А.И. О регулярных колебаниях в тлеющем разряде со скрещенными полями // Журнал технической физики. – 1975. – Т. 45, вып. 6. – С. 1349–1350.