

1. Судзуки Т., Есинага Х., Такнуги С. Динамика дислокацій и пластичность. – М., 1989.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Гласко В.Б. // ФТТ. – 1961. – 3, В.1. – С. 36–46.
3. Шикин В.Б., Шикина Ю.В. // УФН. – 1995. – 165, № 8. – С. 888–905.
4. Стасюк І.В., Пелещак Р.М. // УФЖ. – 1991. – 36, В. 11. – С. 1744.
5. Пелещак Р.М., Лукіянець Б.А., Тупчак В.П. // ЖФД. – 2000. – 4. – С. 165–170.
6. Пелещак Р.М. Электронные состояния деформации решётки кристалла при наличии точечных дефектов // Препринт-69-53 ИТФ ФН УССР. – К., 1989. – 24 с.
7. Taguchi Tsunemasa, Kawakami Yoich , Yamada Yoichi // Physica B. – 1993. – 23. – P. 191–196.
8. Стасюк І.В., Пелещак Р.М. // УФЖ. – 1999. – 44, В. 8. – С. 856–860.
9. Peleschak R.M. // Condensed Matter Physics. – 2000. – 3. – P. 169.
10. Коваленко А.В. // ФТП. – 1997. – 31, В.1. – С. 11.
11. Пелещак Р.М., Лукіянець Б.А. // Письма в ЖТФ. – 1998. – 24, В. 3. – С. 32–38.

УДК 621.793.1

А.Б. Захарків, З.А. Шандра

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних приладів

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ СТРУМУ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ В КОМІРЦІ ПЕННІНГА З СЕКЦІЙНИМ АНОДОМ

© Захарків А.Б., Шандра З.А., 2002

A.B. Zacharkiv, Z.A. Szandra

THE STUDY OF OSCILLATIONS GAS DISCHARGE CURENT IN PENNING’S CELL WITH SECTIONAL ANODE

© Zacharkiv A.B., Szandra Z.A., 2002

Подано результати досліджень коливань електричного струму в комірці Пеннінга з секційним анодом. Виявлено генерацію коливань частотою 2 МГц при подачі на секцію анода від’ємного потенціалу. Досліджено вплив потенціалу секції та розрядного струму на амплітуду коливань, пропонується механізм виникнення коливань.

This work is dedicated to studies of the oscillations of electric current in penning’s cell with sectional anode. The oscillation generation with frequency 2 MHz at applying of negative potential on anode section is detected. The influence of section potential magnitude and discharge current on oscillation magnitude is studied and the mechanism for oscillation origin is proposed.

Вступ. Іонно-плазмова технологія має широке застосування в сучасному виробництві приладів електронної техніки, зокрема для нанесення тонких плівок, травлення, легування. Газовий розряд є ефективним джерелом заряджених частинок в установках еліонної оброб-

ки матеріалів. При виборі виду розряду суттєвим є отримання високої густини плазми при низьких тисках газу. Для цього необхідно досягнути високу іонізуючу здатність електронів на шляху їх руху до анода. Одним із видів розрядів, який можна підтримувати при низьких тисках газів, є розряд Пеннінга в схрещеному електричному та магнітному полях.

В [1] показана можливість отримання в розряді Пеннінга надпровідникових плівок $YBaCuO$. Покращання якості цих плівок вимагає удосконалення методу нанесення з тим, щоб відношення компонент $Y:Ba:Cu$ відповідало стехіометричному складу 1:2:3. Особливість іонного розпилення кераміки $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ призводить до того, що в плівках не витримується стехіометричний склад. Тому є потреба під час процесу вносити в плівку одну із компонент із додаткового джерела. Ця задача розв'язується при використанні комірки Пеннінга з секційним анодом [2]. Дослідження вольт-амперних характеристик цієї комірки, а також розподілу потенціалів між електродами виявило значний вплив потенціалу середньої секції анода на її характеристики. Моделювання в електролітичній ванні показало, що в центрі розрядного проміжку утворюється малоградієнтна ділянка, в якій радіальна E_r та поздовжня E_z компоненти електричного поля близькі до нуля. Наявність цієї особливості приводить до послаблення інтенсивності іонізації в розрядному проміжку і зменшення струму розряду. Очевидно, слід очікувати і її вплив на коливання струму, які є характерними для розряду Пеннінга. Дослідження цих коливань дає змогу глибше зрозуміти процеси в розряді, дати оцінку впливу плазми на плівку, що нарощується.

Методика експерименту. Схема експериментальної установки показана на рис. 1. Комірка Пеннінга містить два мідні катода 1 на відстані 35 мм один від одного, секційний анод 2 на три секції, ізолятори 3 між секціями із фторопласта-4, постійні магніти 4 та екрани 5. Потенціал середньої секції можна було змінювати. Досліджувались анодні секції із міді та алюмінію. Магніти забезпечували індукцію магнітного поля на поверхні катодів $B = 0,26$ Т, в центрі між катодами $B = 0,05$ Т. Коливання струму знімалися з резистора $R = 91$ Ом і реєструвалися осцилографом С1-71. Комірка Пеннінга була розміщена під ковпаком вакуумної установки УВР-3М, досліди проводилися у діапазоні тисків газу 1–10 Па.

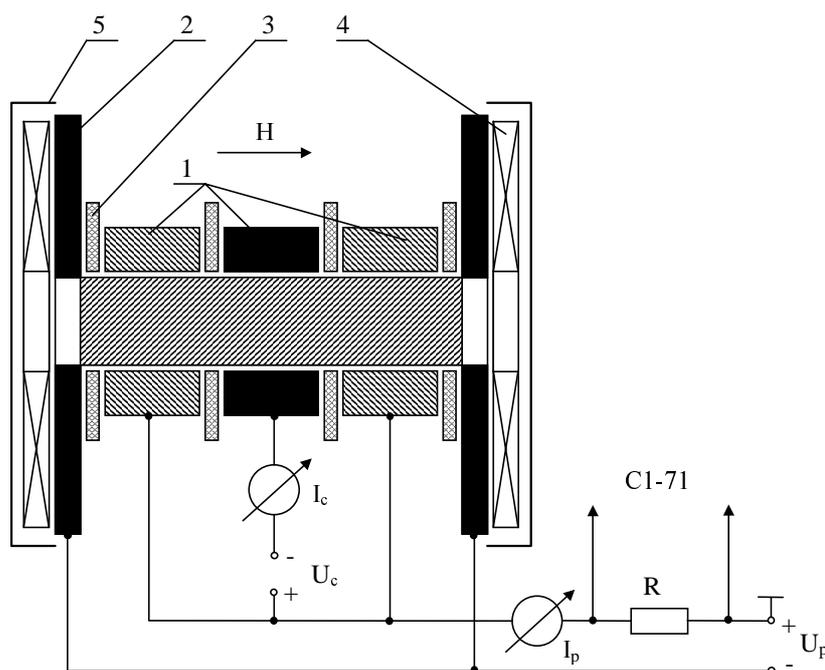


Рис. 1. Комірка Пеннінга з секційним анодом та схема вимірювання коливань струму

Результати досліджень. При подачі на всі анодні секції однакового потенціалу спостерігаються височастотні некогерентні коливання малої амплітуди в діапазоні від десятків до сотень мегагерц. Збільшення струму розряду при постійному тиску газу не впливає на амплітуду коливань, при збільшенні тиску амплітуда незначно зростає. Амплітуда коливань становить 1–2 % від величини розрядного струму.

При подачі на середню секцію від'ємного відносно крайніх секцій потенціалу близько $(0,8-0,9)U_{\text{розр}}$ при певних умовах спостерігаються періодичні коливання з частотою 2 МГц, амплітуда коливань залежить від потенціалу секції і розрядного струму. На рис. 2 подано типову осцилограму струму, максимальна амплітуда коливань відповідає потенціалу секції $U_c = -340$ В для тиску 1,2 Па, збільшення потенціалу на 2–3 В призводить до зриву коливань. Виявлено, що коливання цього типу виникають лише при струмі розряду не більшому за 14 мА, при наявності коливань збільшення розрядного струму приводить до їх зникнення. На рис. 3 подано залежності відносної амплітуди коливань ($I_{\text{колив}}/I_{\text{розр}}$) від потенціалу середньої секції (рис. 3, а) і від розрядного струму (рис. 3, б). Максимальне значення амплітуди коливань наближається до струму розряду.

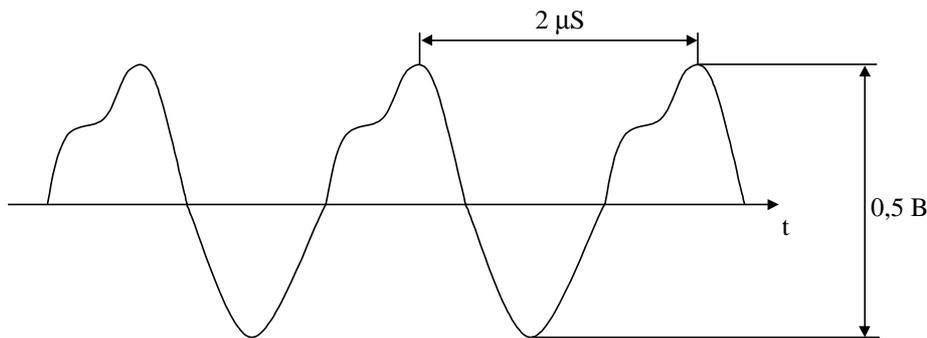


Рис. 2. Типова осцилограма струму розряду при $I_p = 14$ мА, $U_c = 340$ В, $p = 1,2$ Па

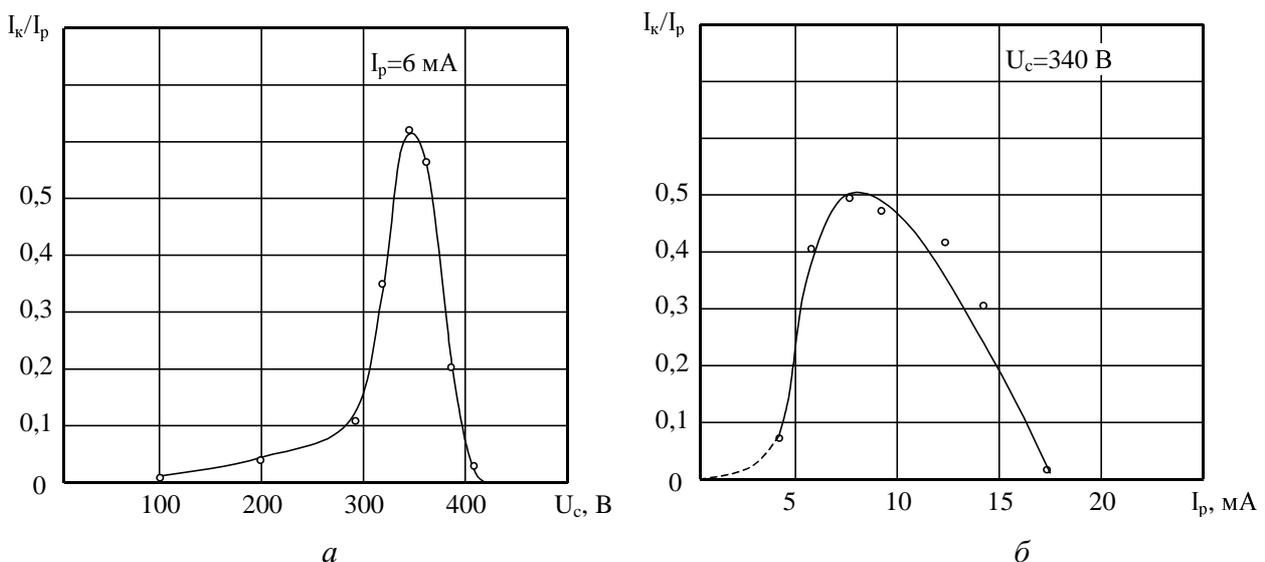


Рис. 3. Залежність відносної амплітуди коливань струму розряду від напруги на середній секції U_c (а) і струму розряду (б)

Коливання не є монохроматичними (рис. 2). Було також виявлено, що значний вплив на виникнення описаних коливань має стан ізоляторів між анодними секціями. Після очистки ізоляторів коливання виникають через 10–15 хв роботи комірки в режимі розряду. При використанні мідної секції коливання зникають через 30 хв роботи, для секції із алюмінію цей час збільшується до 2–3 год.

Обговорення результатів. На основі розв’язання рівнянь руху електрона в схрещених електричному і магнітному полях показано, що в плазмі розряду Пеннінга мають бути присутні коливання циклотронної частоти $\omega_y = \frac{e}{m} \cdot B$ [3]. Враховуючи, що індукція магнітного поля в центрі розрядного проміжку і по периферії плазми має значення $B \approx 0,005\text{--}0,05$ Т, можна очікувати циклотронні коливання в діапазоні частот 200–800 МГц. Крім цього, в комірці Пеннінга електрон здійснює поздовжні коливання між катодами з частотою

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \frac{U_0}{z}}, \text{ де } U_0 \text{ – потенціал у центрі розрядного проміжку, } z \text{ – відстань між катодами.}$$

Якщо прийняти $U_0 = U_{\text{анода}}$, то $f_z = 70\text{--}120$ МГц. Очевидно, що коливання цих частотних діапазонів спостерігається у випадку, коли всі анодні секції з’єднані між собою. Авторами [4] було зафіксовано когерентні коливання в розряді Пеннінга з частотами близько кількох десятків кілогерц, які зумовлені коливаннями густини плазми внаслідок струмово-конвективної нестійкості в плазмі. Для виникнення нестійкості суттєвим є наявність плазми з градієнтом густини, поява коливань дуже критична до індукції магнітного поля та діаметра анода. Коливання цього типу спостерігаються в комірці Пеннінга з центральним розташуванням плазми, коли її периферія охоплена анодом.

На нашу думку коливання струму в комірці Пеннінга з секційним анодом зумовлені видом розподілу електричного поля при подачі на середню секцію від’ємного потенціалу, в результаті чого утворюється малоградієнтна область, своєрідна пастка для частинок, які народились у ній. Реальний розподіл потенціалу в розряді буде дещо інший, але при малих струмах він, очевидно, не сильно відрізняється від змодельованого в електролітичній ванні. Важливо, що в цій малоградієнтній області малі як радіальна E_r , так і поздовжня E_z компоненти, тому в ній спостерігається скомпенсований просторовий заряд. [5]

Розміри цієї області визначаються потенціалом секції, при збільшенні потенціалу (за абсолютної величиною) вона розширюється, основна частка актів іонізації приходить на вузькі області біля катодів та анодної секції. Середня секція стає активним постачальником електронів, які рухаються по циклоїдальних траєкторіях і попадають в малоградієнтну область з малою енергією, порушуючи її нейтральність. Зростає від’ємний потенціал пастки, зменшується напруженість електричного поля біля середньої секції, падає коефіцієнт іонно-електронної емісії, пастка поступово “розряджається”. Ці пульсації некомпенсованого заряду проявляються в коливаннях струму.

Процес аналогічний описаному спостерігається в електронних приладах із схрещеними полями під назвою “діокотронний ефект”. Теорія діокотронного ефекту дається для магнетронних систем, але показано [3], що при певних умовах він проявляється і в пеннінговських системах. Цікаво відзначити, що візуальна картина світіння розряду в комірці Пеннінга з секційним анодом подібна до описаної в літературі [3].

При збільшенні потенціалу середньої секції вище критичної або при збільшенні розрядного струму зростає густина плазми, змінюється розподіл потенціалів між електродами. В попередній роботі було показано, що при певному потенціалі середньої секції струм розряду різко зростає, також зростає струм на зонд, розміщений над цією секцією. Враховуючи, що потенціал середньої секції, при якому відбувається зрив коливачь, та потенціал, при якому відбувається перехід розряду в область великих струмів, є близькими, запропонований механізм виникнення коливачь має певні підстави. Вплив стану ізоляторів, тобто їх поверхневого опору, підкреслює роль розподілу потенціалів на коливачь струму.

Висновки. 1. Виявлено коливачь струму розряду в комірці Пеннінга з секційним анодом з частотою 2 МГц. Амплітуда цих коливачь залежить від від'ємного потенціалу середньої секції.

2. Існують критичні значення потенціалу секції $U_c = 350$ В та розрядного струму $I_p = 7$ мА, вище яких коливачь зникають.

3. Причиною виникнення коливачь може бути пульсація просторового заряду в малоградієнтній області над середньою секцією.

1. Агафонникова Е.В., Шандра З.А. // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* – 1992. – **1**. – С. 123–127.

2. Шандра З.А. // *Вісн. НУ “Львівська політехніка”.* – 2001. – № 430. – С. 120–125.

3. Васильев Г.А. *Магниторазрядные насосы.* – М., 1970.

4. Каганский М.Г., Каминский Д.А., Ключарев А.Н. // *ЖТФ.* – 1964. – **34**, № 6. – С. 1050–1056.

5. Баберцяи Р.П., Бадалян Э.С., Егназарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. // *ЖТФ.* – 1998. – **68**, № 9. – С. 29–32.