

Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

**ЗАГРЕБЕЛЬНИЙ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 533.9

**ВЗАЄМОДІЯ З ПЛАЗМОЮ В КОАКСІАЛЬНОМУ ХВИЛЕВОДІ  
МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗІ СТОХАСТИЧНИМИ  
СТРИБКАМИ ФАЗИ**

01.04.04 — фізична електроніка

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків-2016

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” Національної академії наук України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Карась Вячеслав Ігнатович,**  
Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, начальник лабораторії відділу теоретичної плазмової електроніки та нових методів прискорювання заряджених частинок Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорювання.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Анісімов Ігор Олексійович,**  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, декан факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем.

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Білецький Микола Миколайович,**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, завідувач відділу твердотільної електроніки.

Захист відбудеться “ 1 ” грудня 2016 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12, в залі засідань.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий “ 27 ” жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Незважаючи на те, що останнім часом досягнуті великі успіхи в розвитку плазмової електроніки, ряд важливих питань досі залишається недостатньо або зовсім не вивченим. Серед них, як найбільш важливе питання – це теоретичне та експериментальне дослідження взаємодії стохастичного електромагнітного випромінювання з речовиною. Файнбергом Яковом Борисовичем було визначено [1\*] ряд завдань, які бажано було б розв'язати. Одна з намічених проблем – дослідити ефективність використання мікрохвильового випромінювання зі стохастичними стрибками фази для пробую і підтримки розряду, вирішується в даній роботі.

Раніше було показано [2\*, 3\*], що в стохастичних електромагнітних полях можуть ефективно здійснюватися прискорення заряджених частинок, нагрів плазми і цілий ряд інших корисних процесів. Проте, жоден з отриманих результатів не можна застосувати у випадку, коли частота стрибків фази випадкової величини порівняна з частотою електромагнітної хвилі, як це має місце у проведених експериментах [4\*,5\*]. Отже, необхідно провести детальний розгляд задачі для випадку частих стрибків, що й було зроблено в даній роботі.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених хвилеводам, заповненим магнітоактивною плазмою, повноцінного розгляду хвиль квазі-ТЕМ типу в коаксіальному хвилеводі, заповненому плазмою, за наявності зовнішнього магнітного поля, немає. (У хвилях ТЕМ типу є тільки поперечні компоненти електричного і магнітного полів). Доцільність використання саме коаксіального хвилеводу (КХ) для вивчення розряду, ініційованого мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази (МХВССФ), зробила необхідним дослідити дисперсійні властивості та топографії полів коаксіального хвилеводу в зовнішньому магнітному полі. В результаті, автором знайдено дисперсійні співвідношення, топографії полів та просторовий розподіл потоків енергії для квазі-ТЕМ хвиль, а також для Е та Н хвиль у разі наявності та відсутності зовнішнього магнітного поля, і для різних значень густини плазми.

Рух частинки в стохастичних електромагнітних полях має ряд особливостей. Обмін енергією між МХВССФ і зарядженими частинками при цьому відбувається, незважаючи на відсутність парних зіткнень або синхронізму в русі частинок та поширенні електромагнітних полів. Роль парних зіткнень при цьому відіграють випадкові скачки фаз стохастичних коливань, а середня за період отримувана частинкою енергія пропорційна частоті стрибків фази. Ці особливості МХВССФ дозволяють використовувати його для пробую та підтримки розряду в джерелах квазісонячного світла, для нагріву плазми в термоядерних установках. Подібний шлях має наступні переваги: такі мікрохвилі дозволяють створювати ефективний розряд при більш низьких тисках, ніж необхідно для регулярного мікрохвильового випромінювання, оскільки в цьому випадку відбувається беззіштовхувальний нагрів електронів, тобто відсутні витрати енергії на непотрібні пружні та непружні зіткнення. Як відомо [6\*], взаємодія з плазмою МХВССФ (в порівнянні з регулярною хвилею) дозволяє проникати випромінюванню в плазму з надкритичною густиною, що забезпечує відсутність пульсацій розряду.

Таким чином, можна стверджувати, що дослідження взаємодії стохастичних мікрохвильових полів з плазмою приведе до значного доповнення у розумінні процесів

створення плазми, її нагріву, ефективного проникнення в плазму з надкритичною густиною, що значно поширить область можливих застосувань такого випромінювання. Результати теоретичних досліджень, спрямовані на пошук оптимальних режимів створення розряду та нагріву плазми, можуть бути використані для розробки високоефективних джерел оптичного випромінювання нового типу.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Результати, що становлять основу дисертації, отримані в ННЦ ХФТІ в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт в 2000-20015 роках: “Теоретичне дослідження фізичних принципів і концепцій плазмової НВЧ-електроніки, нових методів прискорювання заряджених частинок в плазмі” (номер держреєстрації 080906UP0010). “Розробка основ плазмової НВЧ-електроніки, нових методів прискорювання заряджених частинок, інерціального термоядерного синтезу, основанийому на пучках важких іонів” (номер держреєстрації 0111U009555). Спільного проекту РФФД-ДФФД Міністерства освіти і науки України №Ф28.2/055 “Газовий розряд низького тиску, ініційований мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази” (номер держреєстрації 0109U007185). Програмою “Перспективи вивчення фізики плазми, керованого термоядерного синтезу і плазмових технологій” (розпорядження Національної академії наук України № 151 від 12.03.2014 та № 186 від 18.03.2015).

Дисертант в зазначених роботах був виконавцем.

### **Мета і задачі дослідження**

Метою даної роботи є встановлення критеріїв та умов функціонування ефективного розряду низького тиску, ініційованого мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази.

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі сформульовано наступні задачі:

1. Теоретично дослідити умови поширення електромагнітних хвиль в коаксіальному плазмовому хвилеводі. Знайти дисперсійні співвідношення для хвиль в коаксіальному хвилеводі, заповненому плазмою, при будь-яких значеннях магнітного поля та густини плазми. Особливу увагу приділити топографіям полів і просторовим розподілам потоків енергії для квазі-ТЕМ хвиль.

2. Теоретично дослідити рух електрона в полі хвилі зі стрибками фази. Провести числовий розрахунок набору енергії електроном в полі такої хвилі при різних значеннях величини стрибка та їх кількості на періоді хвилі. Врахувати вплив пружних зіткнень на процес набору енергії електроном.

3. Теоретично обробити та проаналізувати умови пробою та підтримки розряду МХВССФ при різних тисках і різній потужності мікрохвильового випромінювання. Знайти оптимальну область тиску, в якій стабільний розряд найбільш енергетично вигідний. Розробити методику аналізу експериментальних даних для визначення густини плазми в розряді.

4. Теоретично обробити та проаналізувати експериментально виміряні оптичні характеристики світлового випромінювання з плазми розряду. Знайти залежності спектру розряду від тиску в коаксіальному хвилеводі та від потужності, яка подається на його вхід.

**Об'єктом досліджень** є колективні процеси, які відбуваються в коаксіальному плазмовому хвилеводі при проходженні мікрохвильового випромінювання зі стохастичними стрибками фази.

**Предметом досліджень** у дисертаційній роботі є розряд низького тиску, що створюється і підтримується в коаксіальному плазмовому хвилеводі мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази.

### **Методи дослідження**

При розв'язанні зазначених завдань використовувалися методи теоретичної фізики, аналітичні методи електродинаміки плазми та числові розрахунки. Аналітичні результати отримані за допомогою методів математичної фізики, теорії спеціальних функцій і теорії функцій комплексного змінного. Для числових розрахунків і обробки експериментальних даних застосовуються добре відомі та перевірені методи розв'язання диференціальних рівнянь, нелінійних рівнянь, методи регресійного аналізу.

### **Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі вперше:

- В результаті розв'язку дисперсійного рівняння для коаксіального хвилеводу, повністю заповненого плазмою, при довільних значеннях магнітного поля та густини плазми знайдено різні моди хвиль: квазі-ТЕМ типу, плазмові та електромагнітні. Побудовано топографії полів і просторовий розподіл потоків енергії в різних точках на дисперсійних кривих.

- Показано, що електрон набирає енергію в полі МХВССФ. Враховано вплив пружних зіткнень з молекулами газу на процес набору енергії електроном. Встановлено, що набір енергії пропорційний частоті стрибків фази.

- Знайдені області тисків, в яких умови для пробою та підтримання розряду за допомогою МХВССФ енергетично більш вигідні, ніж для пробою, створеного за допомогою регулярного мікрохвильового випромінювання. Встановлено, що розряд, створений за допомогою МХВССФ, можна ініціювати в області більш низьких тисків, ніж для регулярного сигналу. Це дозволяє уникнути витрат енергії на непотрібні пружні та непружні зіткнення.

- Оброблені та проаналізовані спектри високочастотного сигналу та встановлено, що для зниження напруженості електричного поля МХВССФ, потрібного для пробою і підтримки стаціонарного розряду, доцільно використовувати сигнал з вузьким спектром.

- Оброблені та проаналізовані спектри оптичного випромінювання плазми газового (повітря) розряду при різних тисках і потужності МХВССФ. Показано, що зі зниженням тиску повітря спектр оптичного випромінювання з плазми розряду змінюється, зокрема, в області видимого світла збагачується короткими довжинами хвиль.

### **Практичне значення одержаних результатів**

- Створена теоретична модель для пояснення процесів, що відбуваються при взаємодії стохастичного електромагнітного випромінювання з речовиною для пробою і підтримки вискоефективного розряду.

- Вказано область тисків, в якій пробій і підтримання розряду за допомогою МХВССФ (в порівнянні з регулярним мікрохвильовим випромінюванням) є найбільш енергетично вигідним.

- Показана можливість управління спектром оптичного випромінювання плазми газового розряду низького тиску за допомогою зміни тиску і потужності МХВССФ в коаксіальному хвилеводі.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, які увійшли в дисертацію, отримані при особистій участі автора.

Особистий внесок автора дисертації у всіх опублікованих роботах [1-6] полягає у вирішенні сформульованих завдань і проведенні числових розрахунків, обробці та аналізі експериментальних даних, аналізі літературних джерел, спільному зі співавторами аналізі отриманих результатів, їх підготовці до публікації, написанні статей та доповідей за темою дисертації.

В роботі [1] автором проведені теоретичні дослідження дисперсійних властивостей коаксіального плазмового хвилеводу в магнітному полі. Також проведено числовий розрахунок беззіштовхувального набору енергії електронами в МХВССФ для ситуації, коли момент стрибка та його величина є випадковими величинами.

В роботі [2] автором проведено обробку експериментальних даних реалізацій, зокрема, спектральний аналіз МХВССФ на вході та виході коаксіального хвилеводу при різних значеннях тиску повітря, а також оцінки величини оптимального значення тиску, виходячи з чисельних розрахунків беззіштовхувального набору енергії електроном.

В роботі [3] автором виконана обробка експериментальних даних оптичного випромінювання з плазми розряду, отриманих за допомогою спектрографа ІСП-51. Проведено обробку експериментальних даних і аналіз спектра оптичного випромінювання з розряду.

В роботі [4] автором проведено обробку отриманих за допомогою монохроматора МДР-23 експериментальних даних, а також аналіз й інтерпретація основних ліній спектра оптичного випромінювання з розряду при різних тисках повітря в хвилеводі.

В роботі [5] автором проведені теоретичні дослідження дисперсійних властивостей коаксіального плазмового хвилеводу в магнітному полі. Продемонстровано наявність хвиль квазі-ТЕМ типу в магнітному полі. Показано, що в межах нескінченно сильного і нульового магнітних полів існують хвилі ТЕМ типу.

У роботі [6] автором проведено розрахунок набору енергії електроном в полі МХВССФ при урахуванні пружних зіткнень електронів з молекулами газу.

Усі результати були отримані в ННЦ ХФТІ НАН України.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації були представлені та обговорені на:

III Международная конференция “Современные проблемы светотехники” (Харьков, Украина, 22-23 апреля 2009);

IV-я Международная конференция “Современные проблемы светотехники и электроэнергетики” (Харьков, Украина, 13-14 апреля 2011);

III International Conference “Quantum Electrodynamics and Statistical Physics” (Kharkov, Ukraine, August 29 - September 02, 2011);

39-th EPS Conference on Plasma Physics – 16-th International Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, July 2-6, 2012);

The international conference MSS-14. The Mode conversion, Coherent structure and turbulence (Moscow, Russia, November 24-27, 2014);

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, в тому числі 6 статей у фахових наукових журналах [1-6], з них 5 статей у журналах, які включені до міжнародних наукометричних баз; 5 доповідей та тез доповідей на міжнародних семінарах та конференціях [7-11].

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації складає 160 сторінок, які містять 92 рисунки (з них 2 на 2-х окремих сторінках). Список використаних літературних джерел займає 12 сторінок та нараховує 108 найменувань, додаток займає 9 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**У Вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами ННЦ ХФТІ, сформульовані мета та задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про можливі практичні впровадження результатів роботи, публікації та особистий внесок автора.

**У розділі 1 “Огляд літератури”** проведено огляд досліджень, присвячених теоретичному опису набору енергії електроном в електромагнітних полях з випадковими стрибками фази. Показано, що на сьогоднішній день розглянуті: система квазілінійних рівнянь для хвиль з кінцевим часом кореляції фаз; регулярні стрибки фази заданої величини для монохроматичної хвилі; випадок коли стрибки фази рідкі, в якому можливий опис за допомогою дифузійного рівняння. Вказані проблеми з описом процесів, що відбуваються при взаємодії електромагнітних хвиль зі стрибками фази, та визначені завдання, які потребують розв'язання.

Розглянуто основні роботи, присвячені поширенню електромагнітних хвиль у хвилеводах. Сформульовані завдання, які необхідно розв'язати для отримання повноцінної інформації про хвилі TEM типу при різних значеннях густини плазми та зовнішнього магнітного поля. Визначено, що: детальних досліджень хвиль TEM типу в коаксіальному хвилеводі, заповненому магнітоактивною плазмою, не було проведено; для розряду, ініційованого мікрохвильовим випромінюванням, була відсутня ефективна методика визначення густини плазми та спектрів мікрохвильового та оптичного випромінювання.

**У розділі 2 “Хвилі в коаксіальному плазмовому хвилеводі в магнітному полі”** розглядаються аксіально-симетричні хвилі, які поширюються в заповненому плазмою коаксіальному хвилеводі, уздовж осі якого докладено зовнішнє постійне магнітне поле. Вважаючи, що залежність компонентів електричного і магнітного полів від координат і часу має вигляд:  $A(\vec{r}, t) = A(r) \exp[i(k_3 z - \omega t)]$ , з рівнянь Максвелла для середовища отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
k_3 E_\varphi + k H_r &= 0, \\
ik_3 E_r - ik H_\varphi &= \partial E_z / \partial r, \\
ik \varepsilon_1 E_r - ik_3 H_\varphi + k \varepsilon_2 E_\varphi &= 0, \\
ik \varepsilon_1 E_\varphi + ik_3 H_r - k \varepsilon_2 E_r &= \partial H_z / \partial r, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi) &= -ik \varepsilon_3 E_z, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi) &= ik H_z,
\end{aligned} \tag{1}$$

де  $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{He}^2}$ ,  $\varepsilon_2 = -\frac{\omega_{pe}^2 \omega_{He}}{\omega(\omega^2 - \omega_{He}^2)}$ ,  $\varepsilon_3 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ ,  $\omega_{pe} = \left( \frac{4\pi e^2 n_0}{m_\alpha} \right)^{1/2}$  – ленгмюрівська (плазмова) частота,  $\omega_{He} = \frac{e_\alpha H_0}{m_\alpha c}$  – ларморівська частота електронів.

Спочатку розглядається система рівнянь (1) у разі відсутності магнітного поля,  $\omega_{He}=0$ , і відповідно  $\varepsilon_1=\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_2=0$ . У цьому випадку система розпадається на дві підсистеми рівнянь, не пов'язаних між собою, які описують хвилі Е і Н типу. У хвилі Е типу ненульовими компонентами електромагнітного поля є  $E_z$ ,  $E_r$ ,  $H_\varphi$ , а у хвилі Н типу –  $H_z$ ,  $H_r$ ,  $E_\varphi$ . Окремо розглядаються хвилі TEM типу, в яких дорівнюють нулю  $z$ -компоненти електричного і магнітного полів  $E_z=H_z=0$ . Знаходяться дисперсійні рівняння та топографії полів для TEM хвилі, а так само для хвиль Е і Н типу. Параметри хвилеводу взяті для реального хвилеводу, задіяного у складі експериментальної установки:  $a=0,6$  см – внутрішній,  $b=2,25$  см – зовнішній радіус хвилеводу.

Далі розглянуто задачу при довільних значеннях зовнішнього магнітного поля та густини плазми. У цьому випадку електромагнітні хвилі описуються зв'язаною системою двох диференціальних рівнянь другого порядку. Знайдено розв'язання цієї системи, яке з урахуванням граничних умов для полів:  $E_\varphi=0$  та  $E_z=0$  приводить до дисперсійного рівняння виду:

$$\begin{vmatrix}
\Lambda_1 J_0(\lambda_1 a) & \Lambda_2 J_0(\lambda_2 a) & \Lambda_1 N_0(\lambda_1 a) & \Lambda_2 N_0(\lambda_2 a) \\
\Lambda_1 J_0(\lambda_1 b) & \Lambda_2 J_0(\lambda_2 b) & \Lambda_1 N_0(\lambda_1 b) & \Lambda_2 N_0(\lambda_2 b) \\
J_1(\lambda_1 a) & J_1(\lambda_2 a) & N_1(\lambda_1 a) & N_1(\lambda_2 a) \\
J_1(\lambda_1 b) & J_1(\lambda_2 b) & N_1(\lambda_1 b) & N_1(\lambda_2 b)
\end{vmatrix} = 0, \text{ де } \Lambda_{1,2} = \frac{t \lambda_{1,2} \varepsilon_1}{p - \lambda_{1,2}^2} + \lambda_{1,2} \frac{k}{k_3} \varepsilon_2, \tag{2}$$

$$\lambda_{1,2} - \text{власні значення функцій Бесселя } \lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{q+p}{2} \pm \sqrt{\frac{(q-p)^2}{4} + st}}$$

$$q = k^2 \varepsilon_1 - k_3^2, \quad s = k k_3 \varepsilon_2, \quad p = k^2 \left( \frac{\varepsilon_2^2}{\varepsilon_1} + \varepsilon_3 \right) - k_3^2 \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \quad t = \frac{k^3}{k_3} \varepsilon_2 \left( 1 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \right) - k k_3 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

Проведено числовий пошук коренів дисперсійного рівняння (2) для характерних частот при параметрах, що відповідають умовам експерименту.



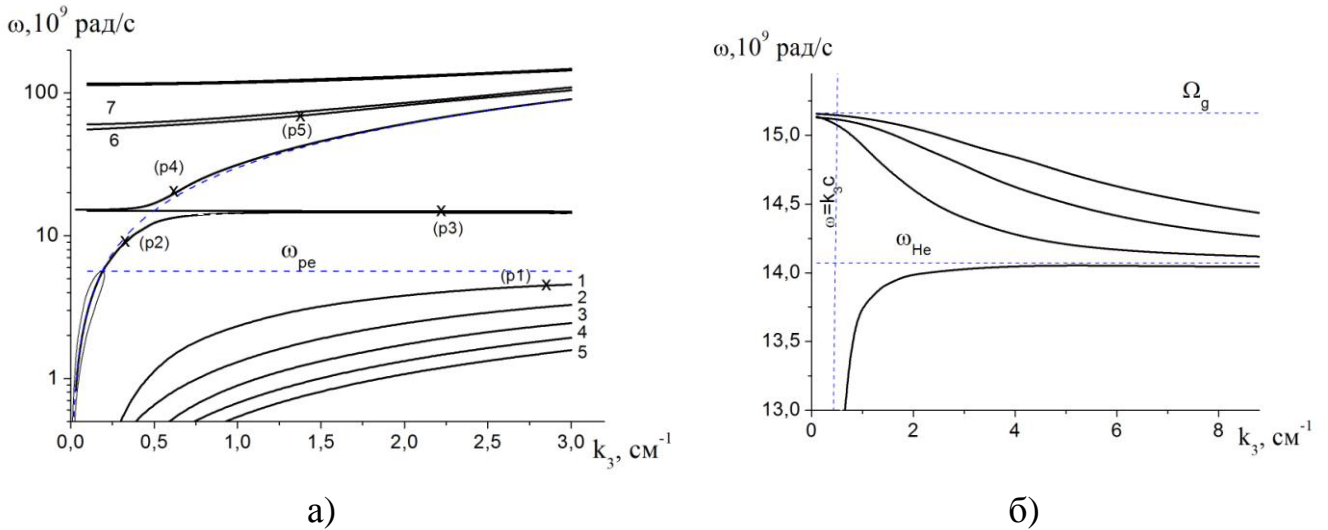


Рисунок 1 – Залежність частоти  $\omega$  від поздовжнього хвильового числа  $k_3$  для випадку  $\omega_{pe}=5,64 \cdot 10^9$  рад/с,  $\omega_{He}=1,4 \cdot 10^{10}$  рад/с: а) спектр в логарифмічному масштабі по осі ординат для  $\omega$ , б) фрагмент спектру в лінійному масштабі

На рис. 1а цифрами (1) - (5) позначені різні моди низькочастотних плазмових хвиль. Високочастотні плазмові хвилі при даних параметрах хвилеводу і плазми проходять дуже близько до гібридної частоти  $\Omega_g = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{He}^2}$ , і для зручності аналізу показані на окремому графіку (рис. 1б). Високочастотна і низькочастотна квазі-ТЕМ хвилі прагнуть до  $\omega = k_3 \cdot c$ , яка на графіку виділена штриховою лінією. Цифрами (6) і (7) на графіку позначені дві перші високочастотні електромагнітні хвилі. Для двох точок, які позначені (p2) та (p4) на рис. 1а, наведено топографії компонент поля: на рис. 2 для точки (p2), та на рис. 4 для точки (p4), а також розподіл потоків енергії для точки (p2) на рис. 3. Поля нормовані на максимальне значення компоненти  $H_r$ .

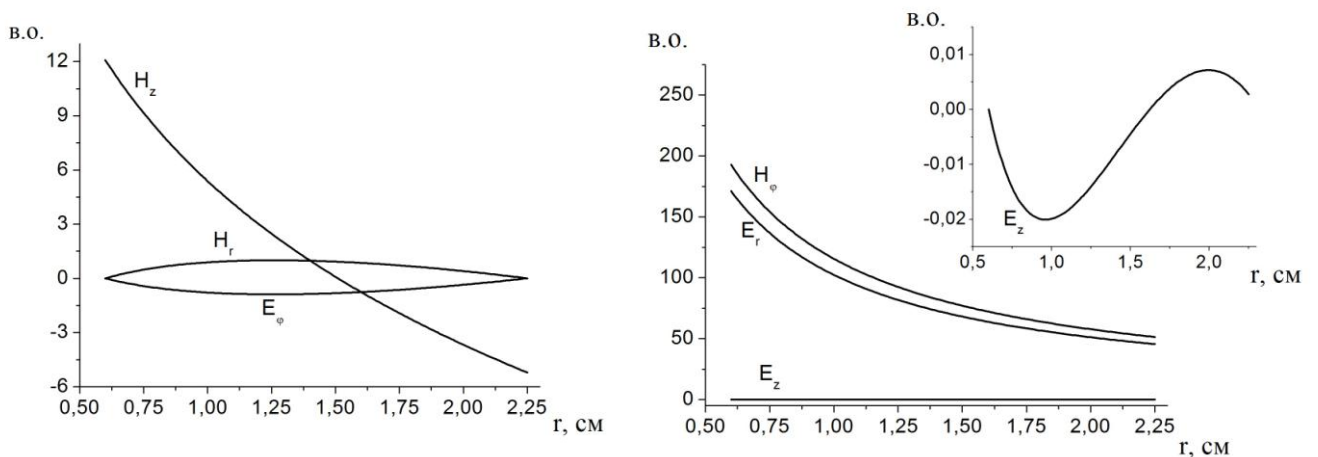


Рисунок 2 – Топографія полів для випадку низькочастотної квазі-ТЕМ хвилі в точці (p2) рисунка 1а,  $\omega=9 \cdot 10^9$  рад/с,  $k_3=0,339 \text{ cm}^{-1}$

Точка (p2) відповідає фазовій швидкості  $v_\phi=2,65 \cdot 10^{10}$  см/с, яка близька до швидкості світла  $c$ . Як видно з графіка, домінуючими є компоненти поля  $E_r$ ,  $H_\phi$  та  $H_z$ . Компоненти вектору Умова-Пойнтінга в точці (p2) наведені на рис. 3.

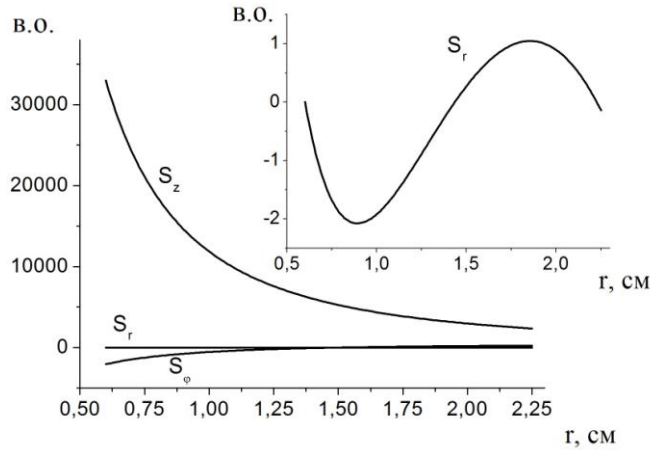


Рисунок 3 – Просторовий розподіл потоків енергії для випадку низькочастотної квазі-ТЕМ хвилі в точці (p2)(рис. 1а),  $\omega=9 \cdot 10^9$  рад/с,  $k_3=0,339$  см<sup>-1</sup>

Вектор Умова-Пойнтінга в напрямку  $z$  для цієї хвилі великий, тому що він визначається добутками  $E_r \cdot H_\phi$  та  $H_r \cdot E_\phi$ , перший з яких великий.

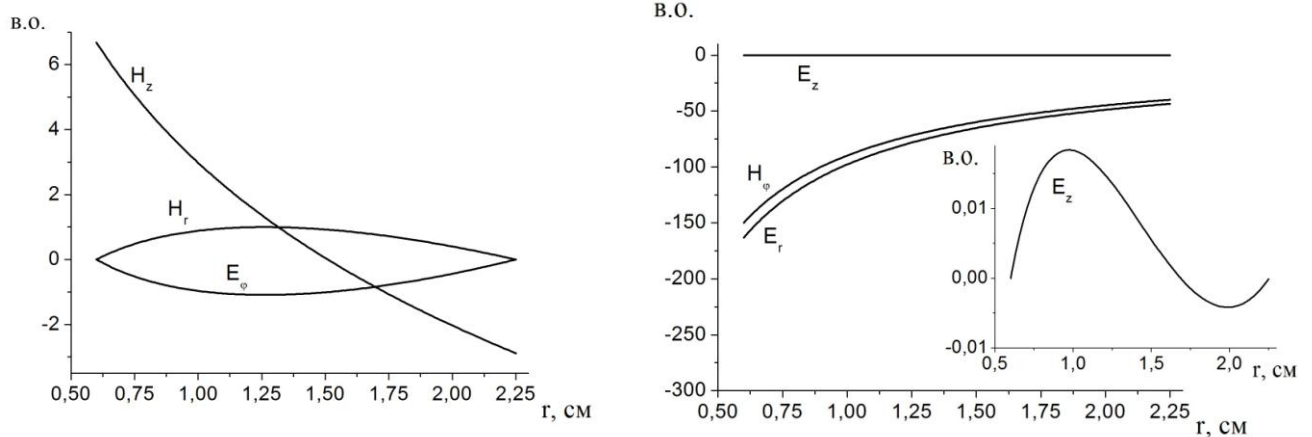


Рисунок 4 – Топографія полів для випадку високочастотної квазі-ТЕМ хвилі в точці (p4) (рис. 1а),  $\omega=2 \cdot 10^{10}$  рад/с,  $k_3=0,613$  см<sup>-1</sup>

Точка (p4) відповідає фазовій швидкості  $v_\phi=3,26 \cdot 10^{10}$  см/с, яка більше швидкості світла  $c$ . Як видно з графіка, домінуючими є компоненти поля  $E_r$ ,  $H_\phi$  та  $H_z$ . Вектор Умова-Пойнтінга в напрямку  $z$  для цієї хвилі великий, тому що він визначається добутками  $E_r \cdot H_\phi$  та  $H_r \cdot E_\phi$ , перший з яких великий.

Таким чином, у другому розділі детально досліджені електродинамічні характеристики конкретного плазмового хвилеводу у разі відсутності і наявності магнітного поля, а також для різних значень густини плазми.

Знайдено дисперсійні співвідношення та топографії полів для ТЕМ хвилі, а також для Е і Н хвиль у разі відсутності зовнішнього магнітного поля, коли Е і Н хвилі розділяться. Досліджена дисперсійна залежність для геометричних параметрів хвилеводу і мікрохвильового випромінювання, що мають місце в експерименті. У цьому випадку для ТЕМ хвилі ненульовими є тільки компоненти поля  $H_\phi$  та  $E_r$ . Фазова швидкість цих хвиль прагне до швидкості світла при зменшенні густини плазми, за-

лишаючись більше швидкості світла. При наявності кінцевого магнітного поля хвилі  $E$  і  $H$  типу не розділяються. Показано, що в цьому випадку ТЕМ хвилі перетворюються в квазі-ТЕМ хвилі, які мають подовжню складову напруженості електричного поля, яка обертається в нуль, якщо густина плазми дорівнює нулю. Чисельно пороховані дисперсійні залежності для різних значень густини плазми та наведені топографії полів і потоків енергії для різних точок на дисперсійних кривих.

У розділі 3 “Набір енергії частинкою в полі хвилі зі стохастичними стрибками фази і пружними зіткненнями з молекулами газу” розглянуто задачу набору енергії електронами в мікрохвильовому випромінюванні зі стохастичними стрибками фази в одночастковому наближенні.

Розглянуто рух електрона в полі хвилі для ситуації, коли момент стрибка та його величина є випадковими величинами. Рівняння руху частинки в безрозмірних змінних буде мати вигляд:

$$\frac{dV}{d\tau} + vV = 2\pi \cdot \cos(2\pi\tau + \varphi(\tau)), \quad (3)$$

де  $V = \frac{v}{v_0}$ ,  $\tau = \frac{t}{T}$  – час відраховуємо в періодах ВЧ-хвилі;  $v_0 = \frac{eE}{m\omega}$  – осциляторна

швидкість,  $v$  – швидкість електрона,  $t$  – час,  $e$  – заряд електрона,  $m$  – його маса,  $\nu$  – безрозмірна частота пружних зіткнень,  $E$  – напруженість електричного поля хвилі,  $\omega = 2\pi/T$  – частота хвилі.

Рівняння для енергії частки в безрозмірних змінних:

$$\frac{d\hat{\epsilon}}{d\tau} = 4\pi V(\tau) \cos(2\pi\tau + \varphi(\tau)) - \nu \frac{m}{M} \hat{\epsilon}, \quad (4)$$

де  $\hat{\epsilon}$  – енергія електрона, нормована на величину  $\epsilon_0 = mv^2/2$ ,  $\nu$  – частота пружних зіткнень, нормована на зворотний період хвилі, а  $M$  – маса молекул. При числових розрахунках зміни енергії доданок  $\nu \frac{m}{M} \hat{\epsilon}$ , який пов’язаний з втратою енергії при пружних зіткненнях, не враховується. Залежність частоти пружних зіткнень  $\nu_m$  від енергії визначається формулою:

$$\nu_m = N \cdot \sigma(\epsilon) \cdot v, \quad (5)$$

де  $N$  – концентрація газу,  $\sigma$  – перетин розсіювання для пружних зіткнень,  $v$  – швидкість електрона.

Для розв’язання системи рівнянь (3) - (4) була написана програма на алгоритмічній мові Паскаль (програма наведена у додатку А). Розв’язання здійснювалося методом Рунге-Кути четвертого порядку апроксимації. Для порівняння з експериментальними даними параметри програми були обрані таким чином, щоб у середньому стрибок фази відбувався кожний період. У випадковий момент часу, розрахований програмою,

фаза електромагнітного поля змінюється на випадкову величину в межах від  $-\pi$  до  $\pi$ . Для збільшення точності в розрахунках використовувалася схема, в якій крок за часом в момент стрибка фази зменшувався.

Газ, який використовується в експериментах - повітря. Залежність перетину пружних зіткнень від енергії електрона наведена на рис. 5. При знаходженні залежності пружних зіткнень від енергії для повітря враховувалося, що відсоткове співвідношення азоту і кисню в повітрі складають 80% і 20%, відповідно.

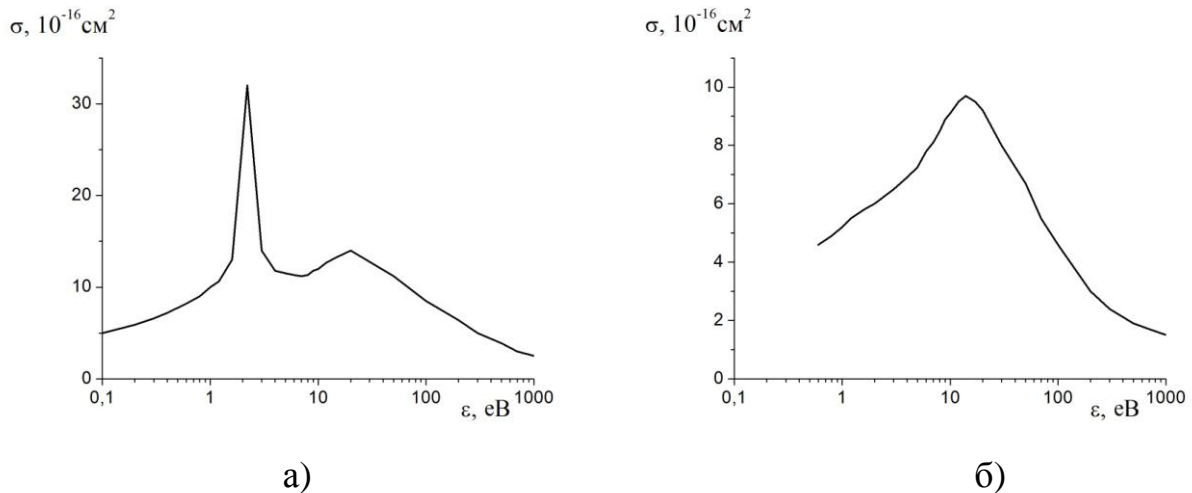


Рисунок 5 – Транспортний перетин розсіювання електрона:  
а) на молекулах азоту  $N_2$ ; б) на молекулах кисню  $O_2$

Числові розрахунки проводилися для декількох точок, взятих на експериментальній залежності електричного поля пробою від тиску, отриманій в роботі [5\*].

Для оцінки впливу зіткнень на набір енергії електронем на кривій пробою взяті точки: в лівій ділянці по тиску (від 1,3 Па до 5 Па), центральній ( $P=13$  Па) та правій ділянках (від 33 Па до 50 Па). Для кожного із трьох значень тиску напруженості поля однакові та дорівнюють:  $E=25$  В/см,  $E=50$  В/см,  $E=75$  В/см,  $E=100$  В/см.

Значення поля  $E$  дозволяють знайти нормувальну константу  $\nu_0$  і, відповідно,  $\epsilon_0$ . Значення тиску  $P$ , для кожної зафіксованої точки, дають значення концентрації  $N$  для формули (5), що дозволяє визначати частоту пружних зіткнень для розрахованої енергії електрона за допомогою рис. 5. Таким чином, у програмі враховується залежність середнього часу між зіткненнями від набраної електронем енергії.

З залежності перетину пружних зіткнень від енергії виходить, що при значеннях  $\hat{\epsilon}$ , які наближаються до  $\hat{\epsilon}_{\max}$ , відповідних максимуму перетину іонізації для  $P=5$  Па, зіткнення відбуваються в середньому раз за період хвили, так само як і стрибки фази. Таким чином, внески зіткнень та стрибків фази в набір енергії електронем стають одного порядку. При більшому тиску зіткнення будуть відбуватися частіше, ніж стрибки фази: при  $P=13$  Па приблизно три рази за період, при  $P=33$  Па - 6 раз за період. Таким чином, стрибки фази відіграють істотну роль лише при низьких тисках, тому розряд ефективний при роботі на лівій частині пробійної кривої, тому що енергія не витрачається на пружні зіткнення. Коли енергія електрона дорівнює осциляторній енергії ( $\hat{\epsilon}=1$ ), пружні зіткнення відбуваються з частотою приблизно один раз на 100 періодів.

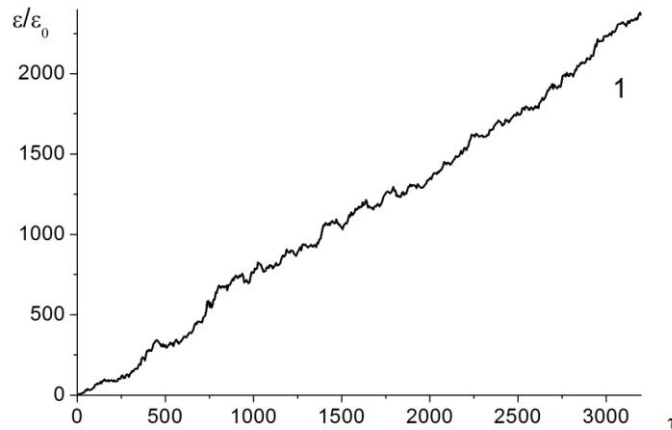


Рисунок 6 – Осереднена за 500 реалізаціями залежність набраної електроном енергії для напруженості поля  $E=25$  В/см та тиску  $P=5$  Па. У цьому випадку  $v_0=1,4 \cdot 10^7$  см/с,  $\varepsilon_0=5,6 \cdot 10^{-2}$  еВ. Час вимірюється в періодах поля МХВССФ

Результати розрахунків набраної електроном енергії представлені на рис. 6. На графіку представлені результати розрахунків після усереднення по 500 реалізаціям. При значенні поля  $E=25$  В/см, осциляторна швидкість електрона  $v_0=1,4 \cdot 10^7$  см/с та нормувальне значення енергії  $\varepsilon_0=5,6 \cdot 10^{-2}$  еВ. Енергія, яку необхідно набрати електрону, відповідає максимуму перетину іонізації азоту і становить приблизно 120 еВ. Відповідно, розрахунок ведеться до відносної енергії, яка дорівнює  $\hat{\varepsilon}_{\max}=2150$ . Характерний час, за який електрон набирає цю енергію  $t_{ion}=6$  мкс, що значно менше тривалості ВЧ-імпульсу, тому протягом імпульсу відбувається суттєве зростання густини плазми.

При наявності стрибків фази хвилі крива пробою розширюється в область низьких тисків і енергетично вигідною є робота в цій області тисків (поблизу лівого краю кривої пробою), тому що внесок зіткнень в набір енергії електронів малий у порівнянні з внеском через стрибки фази. Таким чином, у третьому розділі показано, що створювати ефективний розряд за допомогою випромінювання зі стрибаючою фазою можна тільки при тисках поблизу лівої частини пробійної кривої. При підвищенні тиску втрати енергії на пружні та непружні зіткнення будуть зростати, а це знижує ефективність розряду.

**У розділі 4 “Дослідження спектральних характеристик мікрохвильового випромінювання і параметрів плазми в коаксіальному плазмовому хвилеводі”** розглядається взаємодія потужного МХВССФ зі створеною ним в коаксіальному хвилеводі плазмою. Показано, що при збільшенні потужності МХВССФ на вході хвилеводу в момент виникнення пробою та утворення плазми рівень потужності коливань на виході хвилеводу (3) різко падає (рис. 7). Для ілюстрації на рис. 7 наведено реалізацію для тиску  $P=30$  Па, подібна картина спостерігається в інтервалі тисків від  $P=30$  Па до  $P=2$  Па.

Встановлена суттєва зміна спектрального складу мікрохвильового сигналу після його проходження через плазму, а саме, значне загасання основних складових спектру 1, 2, 3 (див. рис. 8). Це відбувається за рахунок використання їх енергії на іонізацію газу.

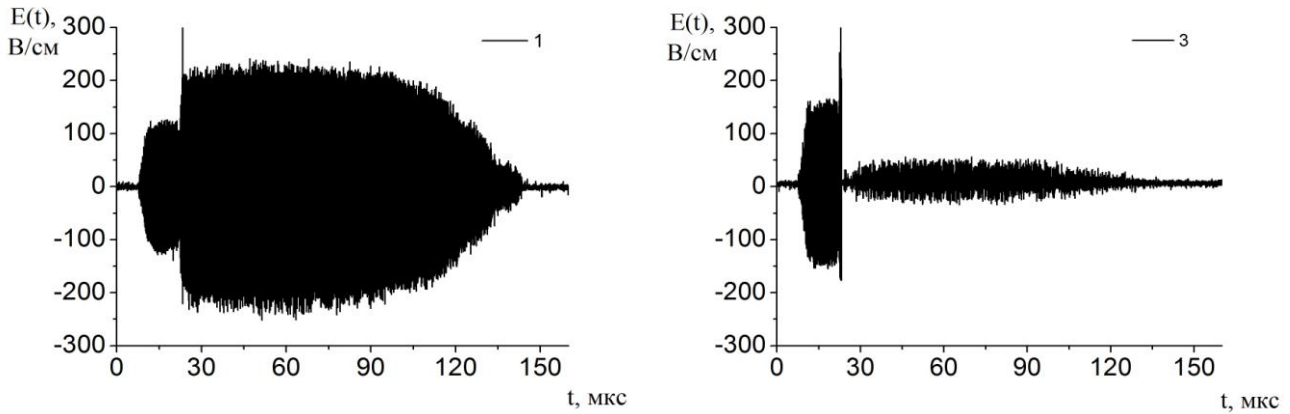


Рисунок 7 – Реалізації  $E(t)$  на вході (1) та виході (3) КХ в мікросекундному масштабі для тиску  $P=30$  Па

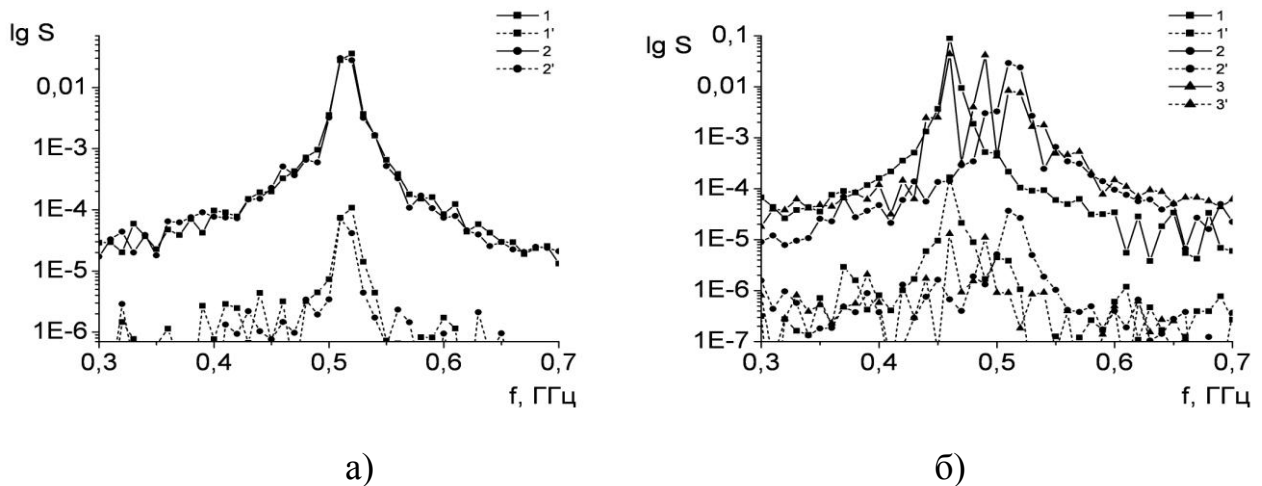


Рисунок 8 – Амплітудно-частотні характеристики  $\lg S(f)$  на вході (1,2,3) та виході (1',2',3') КХ в різні моменти часу упродовж однієї реалізації та для різних тисків: а)  $P=30$  Па, б)  $P=2$  Па

Піки, які пов'язані з основними спектральними складовими МХВССФ, на вході в хвилевід (криві 1,2,3 на рис. 8) значно більші, ніж на виході хвилеводу (криві 1',2',3' на рис. 8). Слід зазначити, що в інтервалі тисків від  $P=30$  Па до  $P=2$  Па, при такій же потужності МХВССФ, спостерігається подібна ситуація.

Також у розділі наведені результати обробки та аналізу експериментальних даних по пробою в розрідженому газі МХВССФ. Показано, що для МХВССФ діапазон тисків робочого газу, в якому здійснюється його пробій, на відміну від регулярного мікрохвильового випромінювання того ж спектрального діапазону, практично не змінюючись для високих тисків, дуже сильно (майже на порядок) розширюється в бік низьких тисків, що обумовлено ефективним беззішовхувальним нагріванням електронів, послабленою дифузією і зниженням втрат на непотрібні пружні та непружні зіткнення.

Встановлено, що для зменшення інтегральної потужності мікрохвильового випромінювання, необхідної для пробою і підтримки розряду, потрібно звуження спектру сигналу при збереженні частоти стрибків фази.



Розроблено методику визначення густини плазми в розряді низького тиску, ініційованому МХВССФ, за допомогою застосування подвійних зондів, цифрового осцилографа і чисельної обробки реалізацій ВЧ сигналів. Струм, що протікає через зонди, вимірювався непрямим методом. Зонди Ленгмюра використовувалися для виведення ВЧ сигналу, і за допомогою обробки цього сигналу, використовуючи спеціальні функції регресії, отримували значення струму при зміні напруги між зондами. Взяті експериментальні дані відповідають тиску  $P=11$  Па, температурі  $T=300$  К та потужності МХВССФ 6,5 кВт.

Густина струму, що приходиться на зонд з площею поперечного перерізу, яка дорівнює  $S_{\text{зонда}}$ , буде:  $j=I/S_{\text{зонда}}$ . З іншого боку:

$$j = en_e v_e, \quad (6)$$

де  $n_e$  – концентрація електронів,  $e$  – заряд електрона,  $v_e$  – його швидкість. Швидкість електрона під впливом зовнішньої напруги  $U_{\text{вн}}$  з урахуванням пружних зіткнень можна оцінити за формулою:

$$v_e = \frac{e}{m_e} \frac{U_{\text{вн}}}{h} \tau_{\text{cm}}, \quad (7)$$

де  $\tau_{\text{cm}}$  – час між пружними зіткненнями:

$$\tau_{\text{cm}} = \frac{1}{N\sigma(\varepsilon)v_e}. \quad (8)$$

Залежність перетину пружних зіткнень від енергії електрона  $\sigma(\varepsilon)$  взята з таблиць для азоту і кисню (рис. 5),  $N$  – концентрація частинок при тиску  $P=11$  Па і температурі  $T=300$  К. З формул (7) та (8) розраховувалася швидкість електрона  $v_e$  в полі, яке створювалось різницею потенціалів  $U_{\text{вн}}$ . Відповідно, з формули (6) була розрахована концентрація електронів в плазмі.

Внаслідок обробки експериментальних даних встановлено, що при потужності МХВССФ, яка дорівнює 6,5 кВт, і тиску повітря в хвилеводі 11 Па значення густини плазми поблизу зондів становлять від  $1 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup> до  $1,5 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>.

**У розділі 5 “Дослідження спектрів оптичного випромінювання з розряду, ініційованого мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази”** проаналізовані спектри оптичного випромінювання з плазми розряду для різних тисків повітря в коаксіальному хвилеводі при потужності МХВССФ 17 кВт. Оптичне випромінювання з плазми розряду в повітрі аналізувалося по першій і другій позитивним системам азоту та окремим атомарним лініям. На рис. 9, 10 зображені ділянки спектру оптичного випромінювання поблизу ліній атомарного водню для двох значень тиску повітря.

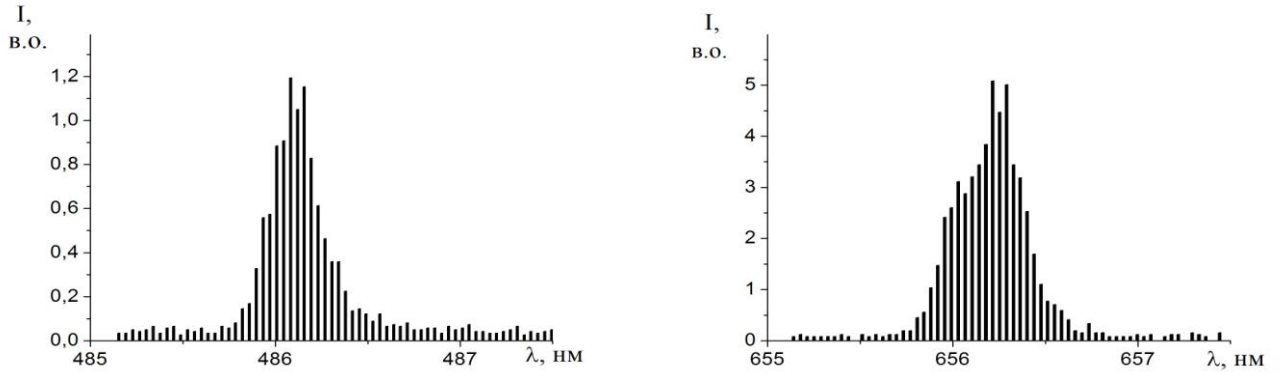


Рисунок 9 – Ділянки спектру поблизу ліній атомарного водню при тиску  $P=4,6$  Па

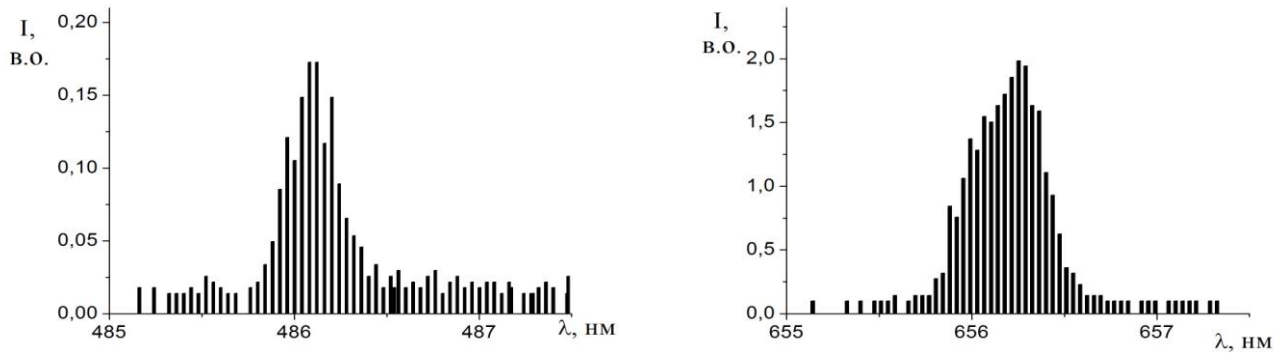


Рисунок 10 – Ділянки спектру поблизу ліній атомарного водню при тиску  $P=28$  Па

Порівняння інтенсивностей цих найбільш яскравих ліній, що перебувають в області видимого спектру, показує, що при тиску  $P = 4,6$  Па співвідношення  $I_{656}/I_{486}=4,2$ , а при тиску  $P=28$  Па співвідношення  $I_{656}/I_{486} = 11,6$ . Це означає, що при низькому тиску лінія 486,1, яка належить діапазону синього кольору, проявляється набагато яскравіше, ніж ця ж лінія при високому тиску. Отже, спостережуваний колір розряду при низькому тиску є більш синім, а при високому тиску - більш червоний.

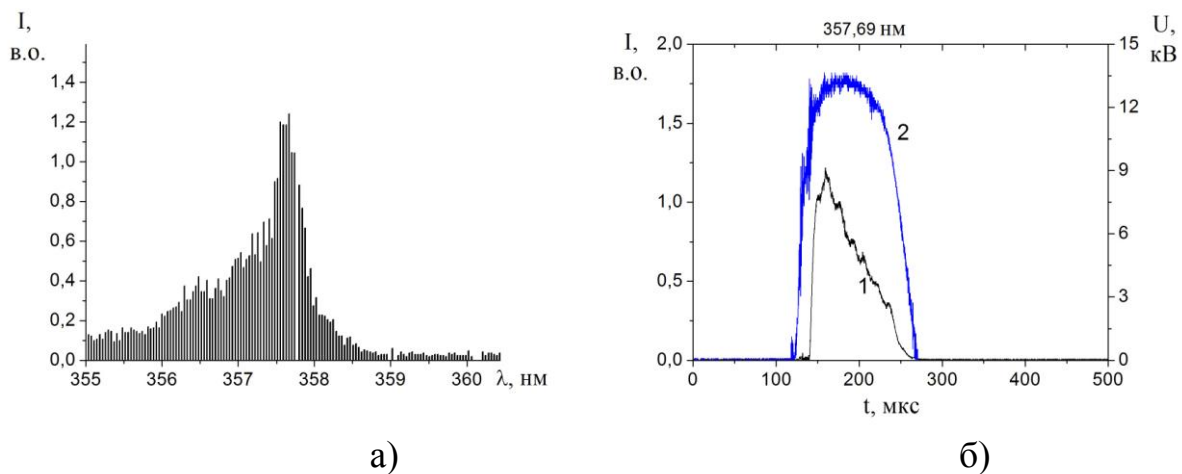


Рисунок 11 – а) Смуга спектру другої позитивної системи азоту  $N_2$ , б) часовий розподіл оптичного випромінювання – 1 (ліва шкала) і імпульс високої напруги – 2 (права шкала) в максимумі лінії. Тиск  $P=4,6$  Па



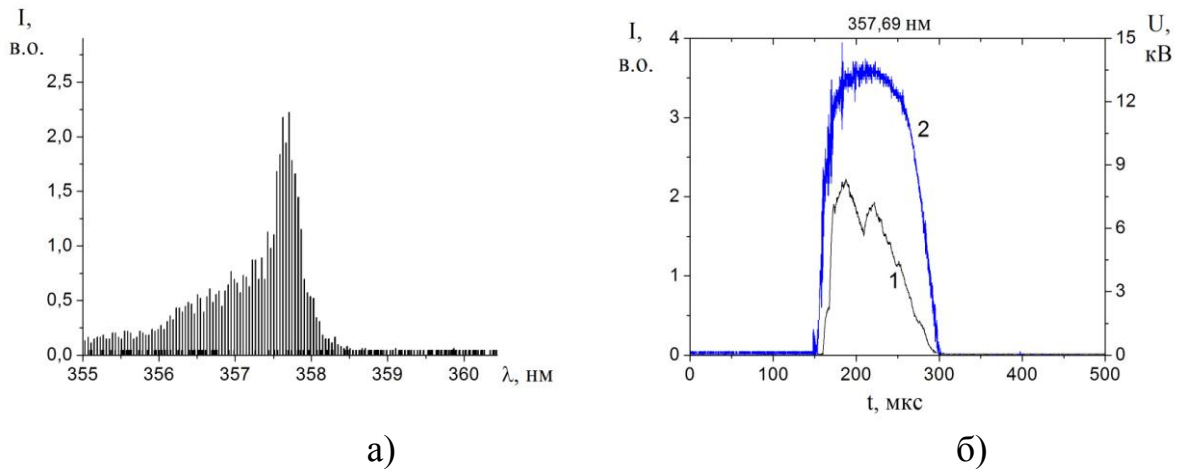


Рисунок 12 – а) Смуга спектру другої позитивної системи азоту  $N_2$ , б) часовий розподіл оптичного випромінювання – 1 (ліва шкала) і імпульс високої напруги – 2 (права шкала) в максимумі лінії. Тиск  $P=28$  Па

На рис. 11, 12 наведені ділянки спектру другої позитивної системи азоту  $N_2$  в діапазоні 355 нм – 360,5 нм та часовий розподіл оптичного випромінювання (крива 1), знятий в максимумі лінії 357,69, та імпульс високої напруги (крива 2). Експериментальні результати при тиску  $P = 4,6$  Па наведені на рис. 11, а результати при тиску  $P=28$  Па – на рис. 12.

На рис.11, 12 бачимо, що оптичне випромінювання з плазми розряду існує практично протягом усієї тривалості імпульсу високої напруги, що свідчить про підтримку розряду при напруженостях поля істотно менших (у 3-5 разів), ніж при пробіі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі знайдено критерії та встановлено умови функціонування ефективного розряду низького тиску, ініційованого МХВССФ. Для розв'язання цих задач побудовано теорію, що описує процес набору енергії електронами в полі електромагнітної хвилі зі стрибками фази. Проведено обробку результатів експериментальних досліджень характеристик розряду, ініційованого МХВССФ.

Основні результати та висновки роботи полягають у наступному:

1. Проведено детальний аналіз дисперсійних властивостей електромагнітних хвиль в коаксіальному хвилеводі, заповненому плазмою. Розв'язані дисперсійні співвідношення для хвиль в коаксіальному хвилеводі, заповненому плазмою, при довільних значеннях магнітного поля і густини плазми. Особливу увагу приділено топографії полів і просторового розподілу потоків енергії для квазі-ТЕМ хвиль.

2. Розроблено програму числового розрахунку набору енергії електроном в полі хвилі зі стохастичними стрибками фази з урахуванням пружних зіткнень. Вказані умови, в яких набір енергії завдяки стрибкам фаз є превалюючим, що важливо для створення ефективного розряду, ініційованого МХВССФ.

3. Вказані умови ефективного пробію і підтримки розряду МХВССФ за тиском робочого газу і потужністю випромінювання. Визначено оптимальну область тиску, в якій існування розряду енергетично найбільш вигідно внаслідок відсутності витрат енергії на непотрібні пружні та не пружні зіткнення. Розроблено оригінальну методику аналізу експериментальних даних для визначення густини плазми в розряді.

4. Запропоновано метод формування спектру оптичного випромінювання з плазми розряду. Знайдені залежності спектру розряду від тиску в коаксіальному хвилеводі і потужності МХВССФ, яка подається на його вхід.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Загребельный И.А. О пробое в коаксиальном волноводе атомарного газа низкого давления микроволновым излучением со стохастически прыгающей фазой / И.А. Загребельный, П.И. Марков, В.О. Подобинский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2008. – №4(6). – С. 195-198.
2. Разряд низкого давления, индуцированный микроволновым излучением со стохастически прыгающей фазой / А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, О.В. Болотов, В.И. Голота, А.М. Егоров, А.Г. Загородний, И.А. Загребельный, В.И. Засенко, В.И. Карась, И.В. Карась, И.Ф. Потапенко, А.Н. Старостин // Доповіді НАН України. – 2010. – № 8. – С. 74-82.
3. Low pressure discharge initiated by microwave radiation with stochastically jumping phase / V.I. Karas`, A.M. Artamoshkin, A.F. Alisov, O.V. Bolotov, V.I. Golota, I.V. Karas`, A.M. Egorov, I.A. Zagrebelny, I.F. Potapenko // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. – 2012. – № 6 (82). – P. 142-145.
4. Optical radiation special features from plasma of low pressure discharge initiated by microwave radiation with stochastic jumping phase / A.F. Alisov, O.V. Bolotov, V.I. Golota, V.I. Karas`, A.M. Egorov, I.V. Karas`, I.F. Potapenko, I.A. Zagrebelny // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Acceleration Methods. – 2013. – № 4 (86). – P. 183-188.
5. Karas` I.V. Electromagnetic modes of a coaxial plasma waveguide in an external magnetic field / I.V. Karas`, I.A. Zagrebelny // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Acceleration Methods. – 2015. – № 4 (98). – P. 36-42.
6. Карась В.И. Набор энергии электронами в поле волны со стохастическими скачками фазы при наличии упругих и неупругих столкновений / В.И. Карась, И.А. Загребельный // Инженерная физика. – 2015. – №11. – С.46-52.
7. О пробое в коаксиальном волноводе атомарного газа низкого давления микроволновым излучением со стохастически прыгающей фазой / В.И. Карась, И.В. Карась, И.А. Загребельный, П.И. Марков, Л.А. Назаренко, В.О. Подобинский // “Современные проблемы светотехники”, III-я Международная конференция, ХНАМГ, 22-23 апреля 2009: сборник тез. докладов. – Харьков, Украина, 2011. – С. 19.
8. Разряд низкого давления, индуцированный микроволновым излучением со скачками фазы / В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, О.В. Болотов, В.И. Голота, А.М. Егоров, И.А. Загребельный, И.В. Карась, А.Г. Загородний, В.И. Засенко, И.Ф. Потапенко, А.Н. Старостин // “Современные проблемы светотехники и электроэнергетики”, IV-я Международная конференция, ХНАМГ, 13-14 апреля 2011: сборник тез. докладов. – Харьков, Украина, 2011. – С. 137-139.
9. Low pressure discharge induced by microwave radiation with stochastically jumping phase / V.I. Karas`, A.F. Alisov, A.M. Artamoshkin, O.V. Bolotov, V.I. Golota, A.M. Egorov, I.V. Karas`, I.F. Potapenko, A.N. Starostin, I.A. Zagrebelny // “Quantum

Electrodynamics and Statistical Physics”, III International Conference, August 29 - September 02, 2011: Book of abstracts. – Kharkov, Ukraine, 2011. – P. 209-210.

10. Low pressure discharge induced by microwave with stochastically jumping phase / A.M. Artamoshkin, A.F. Alisov, O.V. Bolotov, V.I. Golota, V.I. Karas`, I.V. Karas`, I.F. Potapenko, A.M. Egorov, I.A. Zagrebelny // 39-th EPS Conference on Plasma Physics – 16-th International Congress on Plasma Physics, July 2-6, 2012: Book of abstracts. – Stockholm, Sweden, 2012. – P. 150.

11. Development special features of low pressure discharge initiated by microwave radiation with stochastic jumping phase / V.I. Karas`, A.M. Egorov, I.V. Karas`, A.G. Zagorodny, V.I. Zasenkov, I.A. Zagrebelny, L.A. Nazarenko, I.F. Potapenko // The Mode conversion, coherent structure and turbulence. The international conference MSS–14, November 24-27, 2014: Conference Proceedings. – Moscow, Russia, 2014. – P. 203-208.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1\*. Файнберг Я.Б. Плазменная электроника и плазменные методы ускорения заряженных частиц / Я.Б. Файнберг // Физика плазмы. – 2000. – Т. 26, №4. – С.362-369.

2\*. Басс Ф.Г. Квазилинейная теория слаботурбулентной плазмы с учетом корреляции электрических полей / Ф.Г. Басс, Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1965. – Т.49, №1(7). – С. 329-334

3\*. Красовицкий В.Б. Некоторые вопросы теории нелинейного ускорения заряженных частиц : дис. канд. физ.-мат. наук / В.Б. Красовицкий – Харьков, 1966. – 67 с.

4\*. Пучково-плазменный генератор стохастических колебаний дециметрового диапазона / А.К. Березин, Я.Б. Файнберг, А.М. Артамошкин [и др.] // Физика плазмы. – 1994. – Т.20, №9. – С. 782-789.

5\*. Special Features of Low-Pressure Discharge Initiated by Microwave Radiation With Stochastic Jumping Phase / V.I. Karas`, A.M. Artamoshkin, A.F. Alisov [et. al] // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2013. – V.41, № 9. – P. 2458-2463.

6\*. Karas' V.I. Penetration of a Microwave with a Stochastic Jumping Phase (MSJP) into Overdense Plasmas and Electron Collisionless Heating by It / V.I. Karas', V.D. Levchenko // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Acceleration Methods. – 2003. – № 4(3). – P. 133-136.

### Анотація

**Загребельний І.А. Взаємодія з плазмою в коаксіальному хвилеводі мікрохвильового випромінювання зі стохастичними стрибками фази.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена встановленню критеріїв і умов функціонування ефективного розряду низького тиску, ініційованого мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази. В ході роботи проведено розрахунок набору енергії електронами в полі мікрохвильового випромінювання зі стрибками фази довільної величини, які відбуваються в довільний момент часу і з урахуванням пруж-

них зіткнень з молекулами газу. Встановлено, що набір енергії електроном пропорційній частоті стрибків фази.

Знайдені області тисків, в яких умови для пробою та підтримки розряду за допомогою МХВССФ енергетично більш вигідні, ніж для пробою, створеного за допомогою регулярного мікрохвильового випромінювання. Встановлено, що розряд, створений за допомогою МХВССФ, можна ініціювати в області більш низьких тисків, ніж для регулярного сигналу, і, таким чином, уникнути витрат енергії на непотрібні пружні та непружні зіткнення.

З аналізу спектрів мікрохвильового сигналу встановлено, що для зниження потужності електричного поля МХВССФ, потрібного для пробою і підтримки стаціонарного розряду, доцільно використовувати сигнал з вузьким спектром. Розроблено оригінальну методику визначення густини плазми в розряді низького тиску, ініційованого МХВССФ, за допомогою застосування подвійних зондів, цифрового осцилографа і чисельної обробки реалізацій мікрохвильових сигналів.

З аналізу спектрів оптичного випромінювання плазми розряду низького тиску в повітрі при різних тисках і потужності МХВССФ показано, що зі зниженням тиску повітря оптичне випромінювання з розряду змінюється, і в області видимого світла в спектрі випромінювання більше явно присутні короткі довжини хвиль.

Знайдено числові розв'язки дисперсійного рівняння для коаксіального хвилеводу, повністю заповненого плазмою, при довільних значеннях магнітного поля і густини плазми. Знайдено різні моди хвиль: квазі-ТЕМ типу, плазмові та електромагнітні. Побудовано топографії полів і просторовий розподіл потоків енергії в різних точках на дисперсійних кривих.

**Ключові слова:** газовий розряд, тиск газу, мікрохвильове випромінювання зі стохастичними стрибками фази, беззіштовхувальний нагрів електронів, зіштовхувальний нагрів електронів, коаксіальний хвилевід, оптичне випромінювання плазми розряду.

## Abstract

**Zagrebelnyi I.A. Interaction of microwave radiation with stochastically jumping phase with the plasma in the coaxial waveguide.** – Manuscript.

Thesis for the Ph.D. degree in physics and mathematics by the specialty 01.04.04 – physical electronics. – O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the establishment of criteria and conditions for the effective functioning of the low-pressure discharge initiated by the microwave radiation with stochastic phase jumps. In this work, we calculated the energy of the electrons set in a microwave field with phase jumps of arbitrary magnitude and taking place at any given time and taking into account elastic collisions with gas molecules. It was found that a set of electron energy is proportional to the frequency of phase jumps.

The thesis is devoted to the definition of criteria and conditions for the effective functioning of the low-pressure discharge initiated by microwave radiation with stochastically jumping phase. During the work, we calculated the energy increasing of the electrons in the field of microwave radiation with phase jumps of arbitrary magnitude and occurring at

the random time and taking into account elastic collisions with the gas molecules. It is found that the electrons energy increasing is proportional to the frequency of phase jumps.

The pressure range found for the case of the breakdown and maintaining the discharge by MWRSJR are more energetically favorable than the sample created by a regular microwave. It is found that the discharge generated by MWRSJP, can be initiated at lower pressures in comparison to the one initiated by the regular signal, avoiding energy loss due to unnecessary elastic and inelastic collisions.

By the analysis of the spectra of the microwave it is found that aiming to reduce the power of MWRSJP used for the breakdown and maintaining steady discharge, it is advisable to use a signal with a narrow spectrum. The original method was developed for determining the plasma density in the low-pressure discharge initiated by MWRSJP, using dual probes, digital oscilloscope and the numerical processing implementations microwave signals.

From the analysis of the spectra of optical radiation of low pressure discharge plasma in air at different pressures and power of MWRSJP it is shown that the optical radiation from the discharge varies greatly with the air pressure reducing, and in the visible light range the short wavelengths presence is more clear.

Dispersion equation was obtained and the numerical solutions of this equation for a coaxial waveguide completely filled with plasma for arbitrary values of the magnetic field and plasma density was found. We distinguish different branches of waves: the quasi-TEM type, plasma and electromagnetic. The topography of fields and the spatial distribution of energy fluxes at various points in the dispersion curves was built.

**Keywords:** gas discharge, gas pressure, microwave radiation with stochastically jumping phase, collisionless electron heating, collisional heating of electrons, a coaxial waveguide, the optical emission of the plasma discharge.

### Аннотация

**Загребельный И.А. Взаимодействие с плазмой в коаксиальном волноводе микроволнового излучения со стохастическими скачками фазы.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена установлению критериев и условий функционирования эффективного разряда низкого давления, инициированного микроволновым излучением со стохастическими скачками фазы. В ходе работы проведен расчет набора энергии электронами в поле микроволнового излучения со скачками фазы произвольной величины, происходящими в произвольный момент времени, и с учетом упругих столкновений с молекулами газа. Установлено, что набор энергии электроном пропорционален частоте скачков фазы.

Найдены области давлений, в которых пробой и поддержание разряда посредством МВИССФ энергетически более выгоден, чем пробой, созданный с помощью регулярного микроволнового излучения. Установлено, что разряд, созданный посредством МВИССФ, можно инициировать в области более низких давлений, чем для

регулярного сигнала, и, тем самым, избежать потерь энергии на ненужные упругие и неупругие соударения.

Из анализа спектров микроволнового сигнала установлено, что для понижения мощности электрического поля МВИССФ, используемого для пробоя и поддержания стационарного разряда, целесообразно использовать сигнал с узким спектром. Разработана оригинальная методика определения плотности плазмы в разряде низкого давления, инициированном МВИССФ, с помощью применения двойных зондов, цифрового осциллографа и численной обработки реализаций микроволновых сигналов.

Из анализа спектров оптического излучения плазмы разряда низкого давления в воздухе при различных давлениях и мощности МВИССФ показано, что с понижением давления воздуха оптическое излучение из разряда сильно изменяется и в области видимого света в спектре излучения более явно присутствуют короткие длины волн.

Найдены численные решения дисперсионного уравнения для коаксиального волновода, полностью заполненного плазмой, при произвольных значениях магнитного поля и плотности плазмы. Выделены различные ветки волн: квази-ТЕМ типа, плазменные и электромагнитные. Построена топография полей и пространственное распределение потоков энергии в различных точках на дисперсионных кривых.

**Ключевые слова:** газовый разряд, давление газа, микроволновое излучение со стохастическими скачками фазы, бесстолкновительный нагрев электронов, столкновительный нагрев электронов, коаксиальный волновод, оптическое излучение плазмы разряда.