

ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГОВОЙ МОЩНОСТИ ПРОБОЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ СО СКАЧКАМИ ФАЗЫ

А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, В.И. Голота, В.И. Карась, И.В. Карась, С.Н. Маньковский, В.И. Мирный, Г.В. Таран

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

E-mail: golota@kipt.kharkov.ua; v_mirny@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты экспериментальных исследований пробоя в разреженном газе импульсным микроволновым излучением со стохастическими скачками фазы (МВИССФ) в различных режимах работы пучково-плазменного генератора. Показано, что для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы диапазон давлений рабочего газа, в котором осуществляется его пробой, в отличие от регулярного СВЧ-излучения того же спектрального диапазона, практически не изменяясь для высоких давлений, очень сильно (более чем на порядок) расширяется в сторону низких давлений, что обусловлено эффективным бесстолкновительным нагревом электронов, ослабленной диффузией и снижением потерь на упругие и неупругие соударения. Это позволяет расширить область существования разряда и снизить потери энергии на его поддержание.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в последнее время достигнуты большие успехи в развитии плазменной электроники [1], однако важная проблема о взаимодействии стохастического электромагнитного излучения с веществом пока не получила должного развития. Ранее было показано, что в стохастических электромагнитных полях могут эффективно осуществляться ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы [2] и целый ряд других полезных процессов. Напомним, что при этом происходит обмен энергией между СВЧ-стохастическими электромагнитными полями и заряженными частицами, несмотря на отсутствие парных соударений или синхронизма в движении частиц и распространении электромагнитных полей. Роль частоты парных соударений при этом играют случайные скачки фаз стохастических колебаний, а приобретаемая частицей средняя за период энергия пропорциональна частоте скачков фазы. В работах [3-5] установлено, что аномальное поведение коэффициента проникновения таких электромагнитных волн, условия пробоя ими газа, поддержание СВЧ-газового разряда и бесстолкновительного нагрева электронов связаны со стохастическими скачками фазы микроволнового излучения.

2. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МВИССФ

Для проведения исследований по воздействию мощного стохастического СВЧ-излучения на плазму, создаваемую в разреженном газе, в качестве источника излучения использовался пучково-плазменный генератор (ППГ), созданный в ННЦ ХФТИ [6], и модернизированный для условий проведения экспериментов. Импульсный пучково-плазменный генератор состоит из электронной пушки (1), плазменного волновода (2), замедляющей системы (3) в металлическом экране (4), входного (5) и выходного

(6) СВЧ-фидеров, согласующих устройств (7, 8), коллектора электронов (9), изолированного от корпуса с помощью керамического изолятора (14), соленоида (10) для создания продольного магнитного поля, системы откачки (11), напуска рабочего газа (12) и датчика контроля давления газа в системе (13).

Блок-схема генератора и эпюра продольного распределения напряженности магнитного поля представлены на Рис.1.

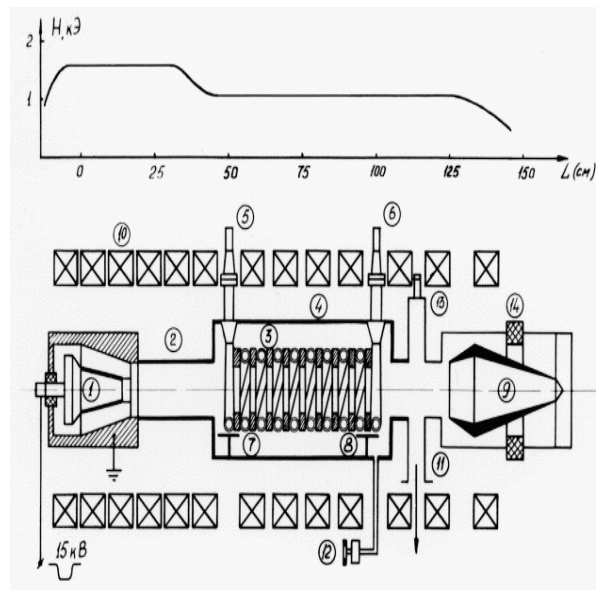


Рис.1. Блок-схема генератора (внизу) и эпюра продольного распределения напряженности магнитного поля (вверху)

Замедляющая структура, представляющая собой модифицированную спираль, рассчитана на синхронную скорость волны, соответствующую энергии электронного пучка 12 кэВ. В качестве источника электронного пучка в генераторе использовалась пушка магнетронного типа, формирующая трубчатый электронный пучок с внешним диаметром 3 см

и внутренним диаметром 2.2 см. Ускоряющее напряжение до 15 кВ, ток пучка до 8 А, длительность импульса 160 мкс, частота следования импульсов 1... 5 Гц.

Блок-схема измерений основных параметров импульсного стохастического СВЧ-излучения при прохождении через создаваемую им в разреженном газе плазму представлена на Рис.2.

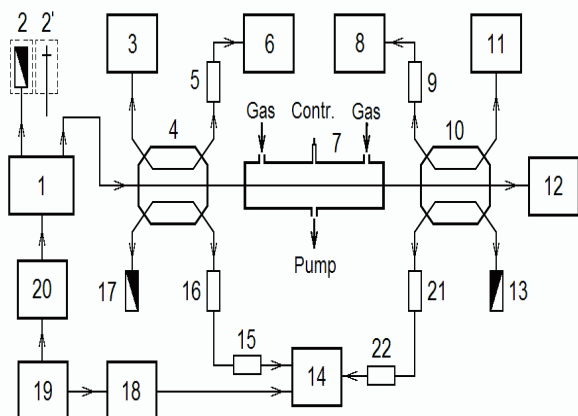


Рис.2. Блок-схема измерений параметров импульсных стохастических СВЧ-колебаний

Стохастические СВЧ-колебания, генерируемые в ППГ (1), с выхода замедляющей структуры через широкополосный коаксиальный ответвитель (4) подавались на вход коаксиального волновода (7) длиной 1.5 м и далее через ответвитель (10) регистрировались измерителем большой мощности (12) типа ИБМ-2. Вход замедляющей структуры генератора подключался к согласованной нагрузке (2) типа Э2-9 или к короткозамыкателю (2'). Ко вторичным плечам направленных ответвителей (4, 10) подключались ваттметры (3, 11) типа М3-54 и через аттенюаторы (5, 9) анализаторы спектра (6, 8) типа С4-60. К другим плечам этих ответвителей подключались коаксиальные нагрузки (17, 13) и через аттенюаторы (16, 21) коаксиального типа Д2-13 и аттенюаторы (15, 22) подключались к осциллографу (14) типа С7-19. Синхронный запуск модулятора (20) высокого напряжения, подаваемого на катод электронной пушки генератора, и осциллографа (14) осуществлялся с помощью запускающего устройства (19). Используя устройство задержки (18), момент запуска осциллографа (14) можно было изменять в пределах длительности импульса высокого напряжения, что позволяло наблюдать реализации СВЧ-колебаний в различные моменты времени от начала импульса тока электронного пучка. При этом регистрировались давление рабочего газа в коаксиальном волноводе, СВЧ-мощность на выходе, реализации (зависимости от времени напряженности электрического поля $E(t)$) стохастических СВЧ-колебаний на входе коаксиального волновода. Для изучения степени стохастичности генерируемых колебаний использовался метод Фурье-анализа реализаций колебаний сложной формы, определялись автокорреляционные функции и времена корреляции τ [7, 8].

В экспериментах с помощью анализатора спектра С4-60 регистрировался интегральный частотный спектр генерируемых колебаний. Установлено, что в максимуме выходной мощности (при давлении рабочего газа, равном $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па) основная часть мощности заключена в интервале частот $\approx 300 \dots 550$ МГц (при этом ширина спектра составляет $250 \dots 270$ МГц).

С помощью четырехканального высокочастотного осциллографа «Tektronix» TDS-2024 (полоса пропускания 2 ГГц, минимальная длительность выборки 0,5 нс) регистрировались: напряжение на электронной пушке U ; ток электронного пучка I ; амплитуда огибающей высокочастотного сигнала A (с разверткой 50 мкс/дел); реализации СВЧ-колебаний (с разверткой 5 нс/дел). Полученные реализации обрабатывались методами корреляционного анализа и определялись частотные спектры, зависимость фазы высокочастотных колебаний от времени и автокорреляционные функции.

На Рис.3 приведены характерные осциллограммы напряжения на электронной пушке, тока электронного пучка и амплитуды огибающей высокочастотного сигнала, соответствующего СВЧ-мощности $\approx 1,2$ кВт.

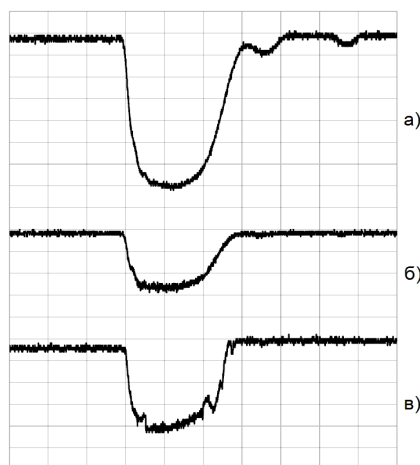


Рис.3. Осциллограммы: а – напряжение на электронной пушке (деление соответствует 1 кВ); б – ток электронного пучка (деление соответствует 1 А) и в – амплитуда огибающей высокочастотного сигнала. Масштаб горизонтальной развертки 50 мкс/дел

Далее будут приведены результаты для трех значений тока электронного пучка: $I_1 = 1.0$ А; $I_2 = 1.5$ А; $I_3 = 1.8$ А.

На Рис.4 показаны характеристики сигналов, зарегистрированные в момент времени 100 мкс от начала импульса тока электронного пучка и соответствующих трем режимам работы генератора, определяемым током электронного пучка ППГ при напряжении 6.2 кВ (Рис.4,а-в) и оптимальном давлении рабочего газа в области взаимодействия ППГ.

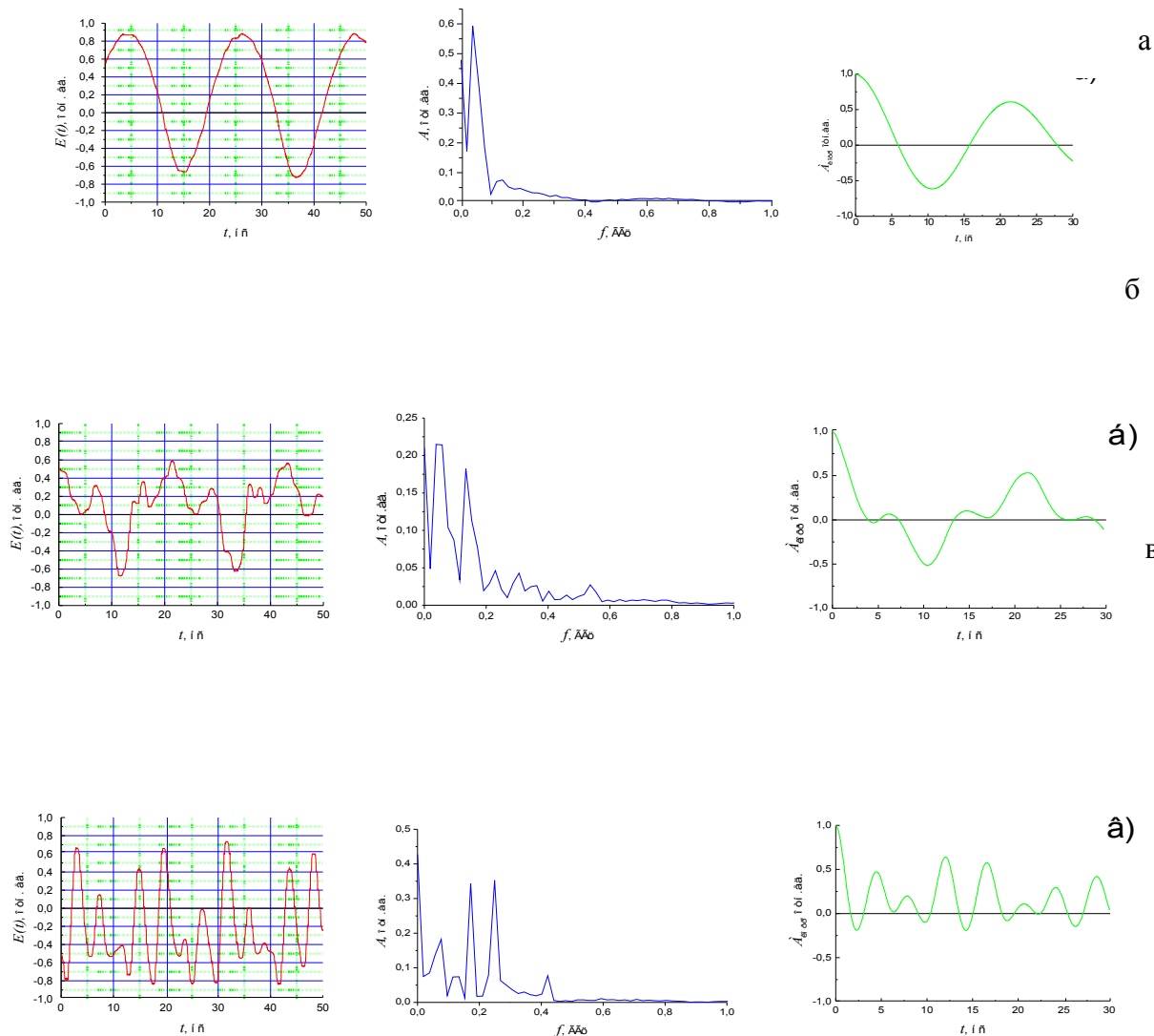


Рис.4. Реализации $E(t)$, амплитудочастотные $A(f)$ и корреляционные характеристики $A_{korr}(t)$ генерируемых колебаний при токах электронного пучка: $I_1 = 1,0 \text{ A}$ (а); $I_2 = 1,5 \text{ A}$ (б); $I_3 = 1,8 \text{ A}$ (в) (напряжение $U = 6,2 \text{ кВ}$)

Видно, что колебания на выходе пучково-плазменного генератора имеют совершенно различный характер при малых и больших токах электронного пучка. Для тока I_1 (см. Рис.4,а) колебания практически синусоидальные с частотой $\approx 50 \text{ МГц}$, корреляционная функция очень слабо спадает со временем, скачков фазы практически не видно. Для токов I_2 , I_3 (см. Рис.4,б,в) скачки фазы происходят несколько раз в течение периода ВЧ-колебаний, в результате чего спектр расширяется в сторону высоких частот. Корреляционные функции, вначале быстро спадая, далее осциллируют практически не убывая, что свидетельствует о большой частоте стохастических скачков фазы.

Видно, что с ростом тока электронной пушки в ППГ время корреляции τ уменьшается. Так для режима, соответствующего $I_1 = 1,0 \text{ A}$ $\tau \approx 6 \text{ нс}$; $I_2 = 1,5 \text{ A}$ - $\tau \approx 4 \text{ нс}$; $I_3 = 1,8 \text{ A}$ - $\tau \approx 1,8 \text{ нс}$. Так как время

корреляции и ширина спектра генерируемых колебаний Δf связаны соотношением

$$\tau \cdot \Delta f \approx 1, \quad (1)$$

то, чем меньше время корреляции, тем шире спектр (и наоборот), т.е. выше степень их стохастичности [7]. Таким образом, с ростом тока в области взаимодействия пучково-плазменного генератора увеличивается степень стохастичности генерируемых колебаний, т.е. возрастает частота и амплитуда стохастических скачков фазы.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ-ПРОБОЯ

Исследования СВЧ-разряда в разреженном газе проводились по следующей методике. Стохастические колебания от пучково-плазменного генератора подавались на вход коаксиального волновода, заполненного рабочим газом при низком давлении. Выход коаксиального волновода был подключен к согласованной нагрузке, в качестве которой исполь-

зовался измеритель больших мощностей ИБМ-2. Мощность генератора фиксировалась на определенном уровне, и находили значения давления газа, при которых в коаксиальном волноводе происходил СВЧ-пробой. Возникновение пробоя определялось по появлению интенсивного свечения в волноводе и резкому падению мощности на его выходе.

Выбор частоты высокочастотного поля, требующий минимальной мощности для пробоя, является определяющим вопросом. Обратим внимание на тот факт, что для синусоидального сигнала (см., например, [9]) зависимость порогового поля от давления происходит пробой газа) от давления для всех газов имеет минимум, разделяющий две ветви. На левой ветви, где порог падает с ростом давления, величина порогового поля тем больше, чем меньше размеры разрядной камеры и чем выше частота поля. На правой ветви, где порог растет с повышением давления, зависимость порогового поля от размеров и частоты становится все менее заметной и в пределе больших давлений почти совсем исчезает: все кривые сходятся к одной.

Режим генерации «узкополосных» стохастических колебаний осуществлялся путем подключения ко входу замедляющей структуры короткозамыкателя, что приводило к полному отражению СВЧ-сигнала от входа замедляющей структуры пучково-плазменного генератора.

В режиме генерации «узкополосного» стохастического СВЧ-излучения были экспериментально определены пороговые значения мощностей, вызывающих пробой рабочего газа (воздух, аргон, гелий) в коаксиальном волноводе. На Рис.5 представлен график зависимости пороговой импульсной мощности стохастических СВЧ-колебаний от давления рабочего газа.

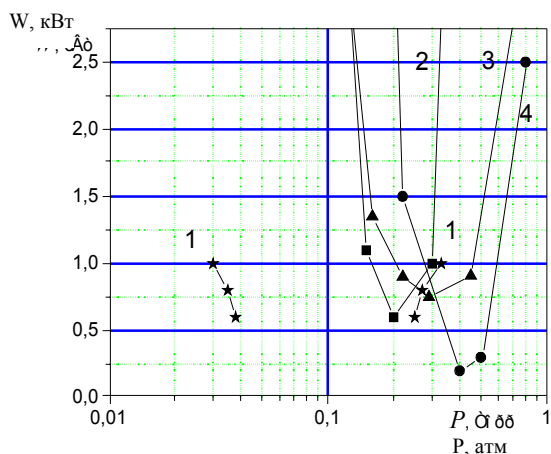


Рис. 5. Зависимости пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления рабочего газа при различных токах: кривая 1 – воздух (фиксированное напряжение, т.е. энергия электронов пучка в ППГ); кривая 2 – воздух; кривая 3 – аргон; 4 – гелий (нефиксированная энергия электронов пучка в ППГ)

На Рис.5 кривая 1 соответствует зависимости пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления воздуха при фиксированной энергии электронов пучка (6,2 кэВ), а мощность колебаний изменялась регулировкой тока электронного пучка в

ППГ. Точки на кривой 1 соответствуют токам I_1, I_2, I_3 , отвечающим мощностям $W_1 \approx 0,6$ кВт, $W_2 \approx 0,8$ кВт, $W_3 \approx 1,0$ кВт. Все остальные кривые (2-4) на Рис.5 соответствуют режиму работы ППГ, при котором выходная мощность СВЧ-колебаний регулировалась изменением напряжения на электронной пушке, т.е. изменением энергии электронов пучка.

Следует отметить, что сорт газа (воздух, аргон, гелий) слабо влияет на зависимость пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления.

Сравнение кривых 1 и 2 (воздух) показывает, что для стохастического СВЧ-излучения при фиксированной энергии электронов пучка диапазон давлений рабочего газа, в котором осуществляется его пробой, в отличие от СВЧ-излучения при изменяемой энергии электронов пучка, практически совпадая для области высоких давлений, очень сильно (более чем на порядок) расширяется в сторону низких давлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований пробоя в разреженном газе импульсным СВЧ-излучением со стохастическими скачками фазы в различных режимах работы пучково-плазменного генератора. Показано, что для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы диапазон давлений рабочего газа, в котором осуществляется его пробой, в отличие от регулярного СВЧ-излучения того же спектрального диапазона, практически не изменяясь для высоких давлений, очень сильно (почти на порядок) расширяется в сторону низких давлений, что обусловлено эффективным бесстолкновительным нагревом электронов, ослабленной диффузией и снижением потерь на упругие и неупругие соударения. Таким образом, для СВЧ-излучения со стохастическими скачками фазы можно расширить область существования разряда и снизить потери энергии на его поддержание. Установлено, что для уменьшения мощности СВЧ-излучения, необходимой для пробоя и поддержания разряда, требуется увеличение частоты скачков фазы микроволнового излучения, что достигается увеличением тока электронной пушки пучково-плазменного генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я.Б. Файнберг. Плазменная электроника и плазменные методы ускорения заряженных частиц // *Физика плазмы*. 2000, т.26, с.362-369.
2. Я.Б. Файнберг, Ф.Г. Басс, В.Д. Шапиро. Квазилинейная теория слаботурбулентной плазмы с учетом корреляции электрических полей // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1965, т.49, в.1 (7), с.329-334.
3. В.И. Карась, Я.Б. Файнберг, А.Ф. Алисов и др. Взаимодействие микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой с плазмой или газом // *Физика плазмы*. 2005, т.31, №9, с.810-822.
4. В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин и др. Пробой и разряд в газе низкого давления, создаваемый микроволновым излучением со стохастически

- прыгаючай фазой (I) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2006, № 5, с.54-58.
5. В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин и др. Пробой и разряд в газе низкого давления, создаваемый микроволновым излучением со стохастически прыгаючай фазой (II) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика плазмы»*. 2006, №6, с.163-165.
 6. А.К. Березин, Я.Б. Файнберг, А.М. Артамошкин и др. Пучково-плазменный генератор стохастических колебаний дециметрового диапазона // *Физика плазмы*. 1994, т.20, №9, с.782-789.
 7. Ф. Ланге. *Корреляционная электроника*. М.: «Судпром», 1963.
 8. А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. *Вопросы прикладного анализа случайных процессов*. М.: «Сов. радио», 1968.
 9. Ю.П. Райзер. *Основы современной физики газоразрядных процессов*. М.: «Наука», 1980.
- Статья поступила в редакцию 05.06.2008 г.*

DEPENDENCE OF THRESHOLD CAPACITY OF BREAKDOWN ON PRESSURE OF GAS IN VARIOUS OPERATING MODES OF THE GENERATOR OF MICROWAVE-RADIATION WITH JUMPS OF A PHASE

A.F. Alisov, A.M. Artamoshkin, V.I. Golota, V.I. Karas', I.V. Karas', S.N. Mankovsky, V.I. Mirny, G.V. Taran

Results of experimental researches of breakdown in rarefied gas by pulse microwave-radiation with stochastic jumps of a phase in various operating modes of the beam-plasma generator are discussed. It is shown, that for stochastic microwave-radiation with jumps of a phase a range of pressure of working gas in which its breakdown is carried out, as against regular microwave-radiation of the same spectral range, practically not changing for high pressures, it is very strong (almost on the order) extends aside low pressure that is caused effective collisionless by heating electrons, the weakened diffusion and decrease in losses on elastic and not elastic impacts. It allows to expand area of existence of the category and to lower losses of energy on its maintenance.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОРОГОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРОБОЮ ВІД ТИСКУ ГАЗУ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА НВЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗІ СТРИБКАМИ ФАЗИ

А.Ф. Алісов, А.М. Артамошкін, В.І. Голота, В.І. Карась, І.В. Карась, С.М. Маньковський, В.І. Мирний, Г.В. Таран

Наведені результати експериментальних досліджень пробою у розрідженому газі імпульсним мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази у різних режимах роботи пучково-плазмового генератора. Показано, що для стохастичного НВЧ-випромінювання зі стрибками фази діапазон тиску робочого газу, в якому відбувається його пробій, на відміну від регулярного НВЧ-випромінювання того ж спектрального діапазону, практично не змінюється для високого тиску, але дуже сильно (майже на порядок) розширюється в бік низького тиску, що обумовлено ефективним безіткненим нагрівом електронів, послабленою дифузією та зниженням втрат на пружні й непружні зіткнення. Це дозволяє розширити область існування розряду і знизити витрати енергії на його підтримання.