

# ПРОБОЙ И ПОДДЕРЖАНИЕ РАЗРЯДА В ГАЗЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ СО СТОХАСТИЧЕСКИ ПРЫГАЮЩЕЙ ФАЗОЙ (I)

*В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, Р. Бингхам\*, В.И. Мирный, И.В. Гавриленко, И.А. Загребельный, И.Ф. Потапенко\*\*, В.С. Ус*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»*

*\*Резерфордовская лаборатория, Великобритания*

*\*\*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Российская академия наук*

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований пробоя и поддержания разряда в разреженном газе импульсным СВЧ-излучением со стохастическими скачками фазы и особенностями прохождения этого излучения через создаваемую им плазму. Показано, что для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы минимум пробойной мощности слабо зависит от давления рабочего газа при его уменьшении от оптимального ( $\approx 50$  Па для аргона), что обусловлено эффективным бесстолкновительным нагревом электронов, ослабленной диффузией и снижением потерь на упругие и неупругие соударения. Это позволяет расширить область существования разряда в сторону более низких давлений.

PACS: 52.80.Pi

1. Как известно, в последнее время достигнуты большие успехи в развитии плазменной электроники [1], но ряд важных вопросов до сих пор остается недостаточно или совсем не изученным. Среди них, как более важный вопрос – это теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия стохастического электромагнитного излучения с веществом. 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 работе [3] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований и численного моделирования прямого и наклонного падения на поверхность раздела вакуум-плазма со сверхкритической плотностью линейно поляризованных электромагнитных волн, в которых установлено, что аномальное поведение коэффициента проникновения, условий пробоя, СВЧ-газового разряда и бесстолкновительного нагрева электронов связаны с прыжками фазы МВСПФ.

Таким образом, можно утверждать, что исследование воздействия стохастических СВЧ-полей на газ и плазму приведет к существенному дополнению в понимании процессов такого воздействия и значительно расширит область его возможных приложений.

2. Для проведения исследований по воздействию мощного стохастического СВЧ-излучения на плазму, создаваемую в разреженном газе, в качестве источника излучения использовался пучково-плазменный генератор, созданный в ННЦ ХФТИ [4], и модернизированный для условий проведения экспериментов.

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

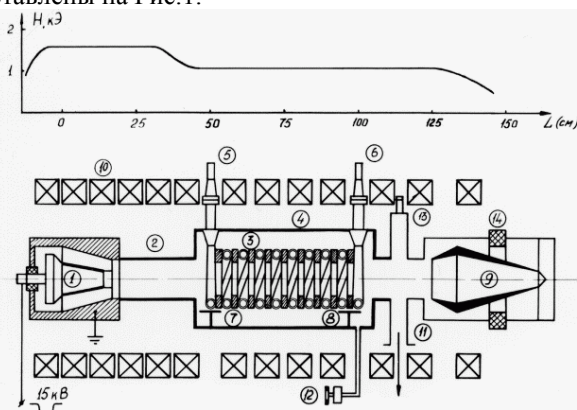


Рис.1. Блок-схема импульсного плазменно-пучкового генератора и продольное распределение напряженности магнитного поля

Импульсный плазменно-пучковый 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 от качки (11), напуска рабочего газа (12) и датчика контроля давления в системе (13).

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.

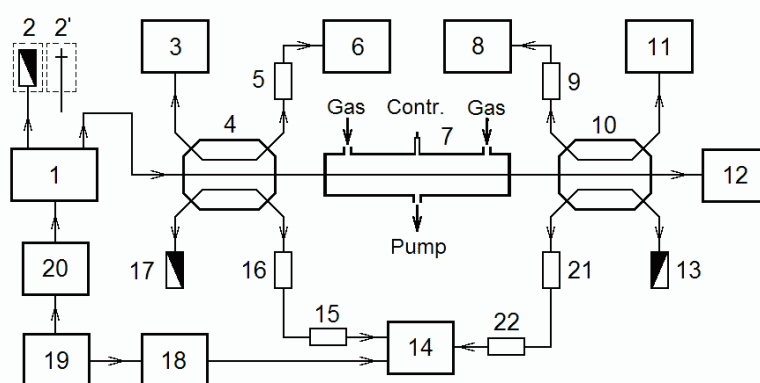


Рис.2. Блок-схема измерений параметров импульсных стохастических СВЧ-колебаний

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

Стохастические СВЧ-колебания, генерируемые в пучково-плазменном генераторе (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 короткозамкателью (2'). Ко вторичным плечам направленных ответвителей (4,10) подключались ваттметры (3,11) типа МЗ-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 контролировались давление рабочего газа в коаксиальном волноводе, мощность и спектры стохастических СВЧ-колебаний на входе и выходе коаксиального волновода.

Для изучения степени стохастичности генерируемых колебаний использовался метод Фурье - анали-

за реализаций колебаний сложной формы, определялись автокорреляционные функции и времена корреляции. С помощью фазочастотного анализа колебаний [5, 6] получены данные о поведении частоты, фазы и амплитуды СВЧ-колебаний.

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 экрана высокочастотного осциллографа С7-19 фотографировались реализации СВЧ-колебаний, по которым методами корреляционного анализа определялись автокорреляционные функции, частотные спектры и зависимость фазы колебаний от времени.

На Рис.3 показаны осциллограммы с характерными реализациями сигналов, сфотографированные в момент времени после 100 мкс от начала импульса тока электронного пучка и соответствующих трем режимам работы генератора, определяемых давлением рабочего газа в области взаимодействия.

Видно, что колебания на выходе пучково-плазменного генератора носят нерегулярный характер с заметными скачками фазы. Можно заметить также, что степень стохастичности СВЧ-колебаний увеличивается с ростом давления рабочего газа в области взаимодействия. Для этих же трех режимов работы пучково-плазменного генератора проведен анализ СВЧ-колебаний корреляционным и фазочастотным методами. На Рис.4 (а-с) представлены графики фазовых и амплитудных спектров и соответствующих автокорреляционных функций исследуемых колебаний.

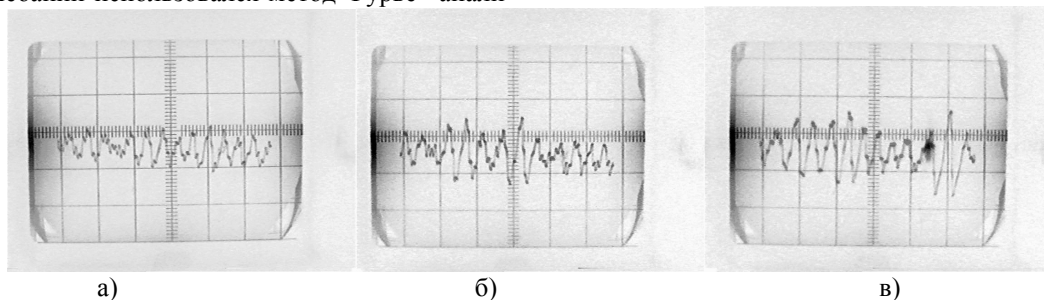


Рис.3. Осциллограммы высокочастотных сигналов при давлениях рабочего газа:  
а) –  $P = 6.5 \cdot 10^{-4}$  Па; б) –  $P = 1.3 \cdot 10^{-3}$  Па; в) –  $P = 2.7 \cdot 10^{-3}$  Па.

Масштаб длительности развертки – 5 нс/дел

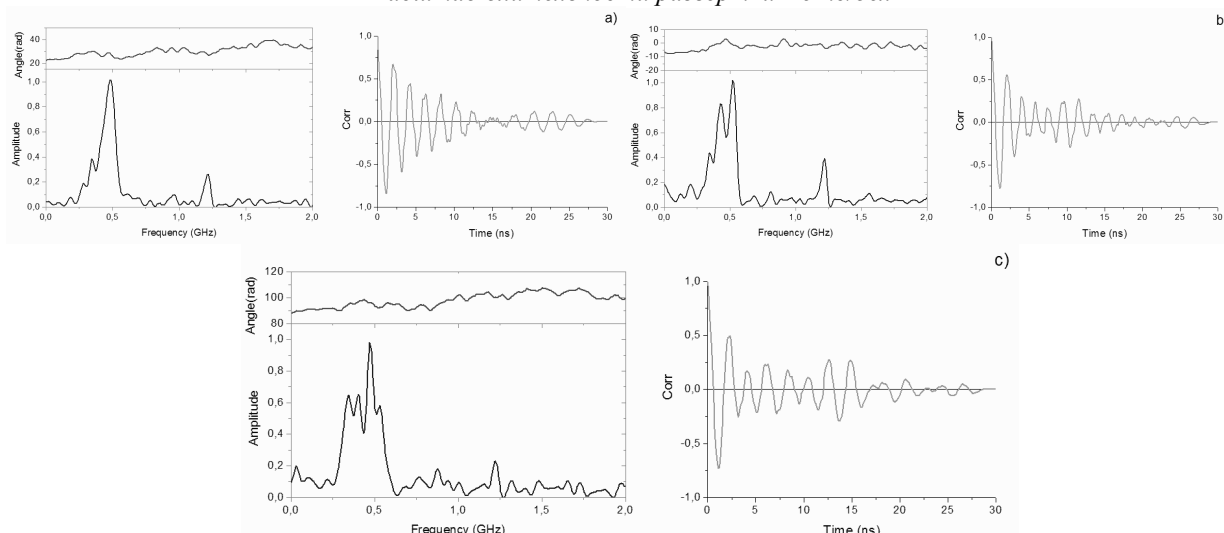


Рис.4. Фазочастотные и корреляционные характеристики генерируемых колебаний при давлениях рабочего газа: а) –  $P = 6.5 \cdot 10^{-4}$  Па; б) –  $P = 1.3 \cdot 10^{-3}$  Па; в) –  $P = 2.7 \cdot 10^{-3}$  Па

Видно, что с ростом давления рабочего газа в плазменно-пучковом генераторе время корреляции уменьшается. Так для режима, соответствующего давлению  $P = 6.5 \cdot 10^{-4}$  Па, время корреляции  $\tau \approx 15$  нс, для  $P = 1.3 \cdot 10^{-3}$  Па –  $\tau \approx 10$  нс и для  $P = 2.7 \cdot 10^{-3}$  Па –  $\tau \approx 5$  нс. Так как время корреляции и ширина спектра генерируемых колебаний  $\Delta f$  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 [5]. Таким образом, с ростом давления рабочего газа в области взаимодействия пучково-плазменного генератора увеличивается степень стохастичности генерируемых колебаний.

3. Как показало численное моделирование, монохроматическое поле полностью отражается (за исключением фронта) от границы вакуум-плазма, микроволновое излучение со стохастически прыгающей фазой (МВИСПФ) слабо отражается, что связано с прохождением в плазму импульсов при срыве фазы волны. Коэффициент прохождения широкополосного излучения, имеющего ту же спектральную плотность энергии, что и МВИСПФ меньше на порядок и обусловлен тем, что в этом случае плазменный слой просто работает как фильтр, пропуская волны с  $\omega > \omega_p$  и отражая остальные. В случае косоугольного падения электромагнитное поле сильно влияет на электроны (особенно для больших углов падения). Продольные поля близки по величине к поперечным полям. Продольная энергия электронов (и их температура) вырастает в несколько раз. Функция распределения электронов имеет немаксвелловский характер, есть ускоренные электронные «хвосты». Энергия падающей поперечной волны частично преобразуется в продольную волну, частично – в энергию электронов.

4. Исследования СВЧ-разряда в разреженном газе проводились по следующей методике. Стохастические колебания от пучково-плазменного генератора подавались на вход коаксиального волново-

да, заполненного рабочим газом (воздух, аргон) при низком давлении. Выход коаксиального волновода был подключен к согласованной нагрузке, в качестве которой использовался измеритель больших мощностей ИБМ-2. Мощность генератора плавно увеличивалась до момента возникновения СВЧ-разряда в коаксиальном волноводе. Момент возникновения разряда определялся по появлению интенсивного свечения в волноводе и резкому падению мощности на его выходе.

Режим генерации стохастических колебаний осуществлялся путем подачи через ферритовый вентиль на вход замедляющей структуры регулярного сигнала с генератора Г4-37А мощностью  $\approx 1$  Вт на частоте 400 МГц, либо использовался короткозамыкатель, 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) в коаксиальном волноводе. На Рис.5 представлен график зависимости пороговой импульсной мощности стохастических СВЧ-колебаний от давления рабочего газа.

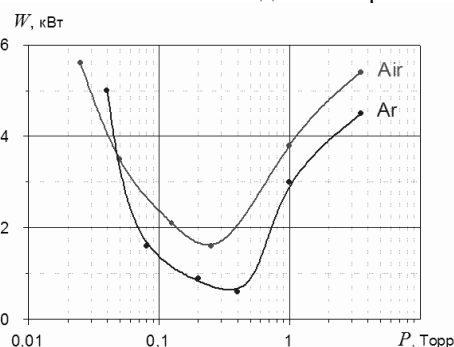


Рис.5. Зависимости пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления рабочего газа

Из рисунка видно, что для каждого из газов существует оптимальное давление, при котором пороговая мощность пробоя газа минимальна. Для арго-

на оно составляет  $\approx 53$  Па, а для воздуха –  $\approx 40$  Па. При этом пороговая мощность равна 0.6 кВт и 1.6 кВт, соответственно.

Зависимости порога СВЧ-разряда от давления газа наблюдались ранее в работе А. Мак-Дональда [7] для регулярного сигнала. В экспериментах использовался цилиндрический резонатор. Давление рабочего газа (аргона), соответствующее минимальному значению напряженности электрического поля ( $\approx 60$  В/см на частоте 994 МГц), при которой наблюдался СВЧ-пробой, составляло  $\approx 156$  Па.

Сравнение показывает, что в отличие от регулярного сигнала для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы минимальная пробойная мощность слабо зависит от давления рабочего газа (аргона) при его уменьшении от оптимального значения.

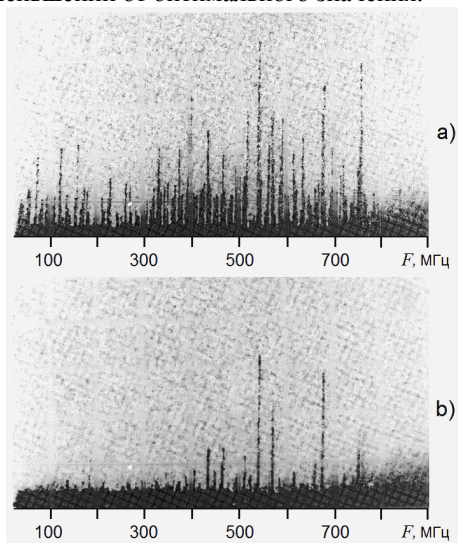


Рис. 6. Интегральный спектр СВЧ-колебаний на входе (а) и выходе (б) коаксиального плазменного волновода

Интегральные спектры стохастических СВЧ-колебаний, снятые с помощью анализатора спектра С4-60 на входе коаксиального волновода и на его выходе, представлены на Рис.6,а,б. Исходный спектр является довольно широкополосным. В нем присутствуют колебания с частотами от десятков до сотен мегагерц (Рис.6,а). Как видно, максимальные амплитуды спектральных составляющих наблюдаются в диапазоне частот 400...750 МГц и на  $\sim 20...30$  дБ превышают амплитуды колебаний в других областях спектра. Такой сигнал подавался на вход коаксиального волновода и, поджигая в нем плазму, взаимодействовал с ней и регистрировался на его выходе.

Интегральный спектр сигнала, прошедшего через плазменный волновод, существенно отличался от спектра входного сигнала (Рис.6,б). Из рисунка видно, что спектр колебаний значительно сузился. Колебания с частотами до 400 МГц, практически отсутствуют, что связано со значительным затуханием низкочастотных составляющих спектра при их прохождении через плазму. Кроме того, происходило обеднение спектра и в диапазоне частот 400...750 МГц (чем меньшую амплитуду имела спектральная составляющая, тем большее затухание она

испытывала). Этот факт свидетельствует о нелинейном характере взаимодействия мощного стохастического СВЧ-излучения с создаваемой им в разреженном газе плазмой. Выбор частоты высокочастотного поля, требующий минимальной мощности для пробоя, является определяющим вопросом. Обратим внимание на тот факт, что (см., например, [8]) зависимость порогового поля (поля, при котором 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.

Все эти результаты качественно объясняются на основе элементарных представлений о скорости набора энергии электроном в переменном поле и при помощи критерия стационарного пробоя. Как известно, для СВЧ-разряда в регулярных электромагнитных полях минимальная напряженность поля достигается при равенстве частоты столкновений  $\nu_p$  циклической частоте электромагнитного поля  $\omega$  [8]. Так, минимальная напряженность электрического поля для пробоя может быть найдена из следующего выражения:

$$E_{tr} = \left( \frac{Dm\omega^2 I_{Ar}}{e^2 \Lambda^2 \nu_p} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $m$ ,  $e$  – соответственно масса и заряд электрона,  $\Lambda$  – характерный размер области пробоя газа. Для аргона при  $f \approx 3.0$  ГГц регулярного электромагнитного излучения и давлении около 665 Па она составляет 500 В/см.

Мы предлагаем использовать СВЧ-колебания со стохастически прыгающей фазой для поджига разряда в аргоне, что позволит создавать разряд при более низких давлениях, потому что скачки фазы обеспечат ограничение диффузии электронов и бесстолкновительный нагрев электронов без потерь энергии, связанных с упругими и неупругими соударениями. Кроме того, может быть легко реализован однородный СВЧ-разряд, так как стохастическое СВЧ-излучение проникает в плазму со сверхкритической плотностью (см. [3]).

Рассмотрим условия пробоя в аргоне для конкретного случая использования СВЧ-излучения, получаемого с помощью генератора, описанного выше. Средняя рабочая частота составляла  $f \approx 400$  МГц, средняя частота скачков фазы  $\nu_{jp} = 2 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ . Следует иметь в виду, что сечение упругих столкновений электронов с атомом аргона изменяется очень сильно (около 30 раз) при изменении энергии электрона от нуля и вплоть до энергии ионизации  $I_{Ar} = 15.76$  эВ, превышая в максимуме в

несколько раз сечение ионизации, соответствующее энергии электронов около 15...20 эВ. При давлении аргона 4 Па частота ионизационных столкновений сравнивается с частотой скачков фазы.

Преимуществом работы в таких условиях является сведение к нулю потерь энергии при упругих столкновениях с сохранением незначительной диффузии и эффективной передачи энергии электромагнитного поля электронам. Подставляя в (2) в качестве  $V_p$  эффективную частоту скачков фазы, получаем необходимую пороговую напряженность электромагнитного поля, которая не превышает в нашем случае 50 В/см.

Обратим внимание, что теоретические оценки сделаны для одночастотного СВЧ-излучения со скачками фазы. В реальном генераторе, используемом в эксперименте, ширина спектра составляла (250...270 МГц). Поэтому напряженности электрического поля, а значит и мощности, необходимые для пробоя, в экспериментальных условиях существенно выше, чем приведенные теоретические значения.

5. В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований пробоя и поддержания разряда в разреженном газе импульсным СВЧ-излучением со стохастическими скачками фазы и особенностями прохождения этого излучения через создаваемую им плазму. Показано, что для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы минимум пробойной мощности слабо зависит от давления рабочего газа при его уменьшении от оптимального ( $\approx 50$  Па), что обусловлено эффективным бесстолкновительным нагревом электронов, ослабленной диффузией и снижением потерь на упругие и неупругие соударения. Это позволяет расширить область существования разряда в сторону более низких давлений. Установлено, что: для уменьшения мощности СВЧ-излучения, необходимой для пробоя и поддержания разряда, требуется сужение спектра (увеличение спектральной плотности мощности) при сохранении частоты скачков

фазы; существует оптимальное давление, при котором пороговая мощность пробоя газа минимальна. Для аргона оно составляет  $\approx 40$  Па, а для воздуха  $\approx 33$  Па. Продемонстрировано существенное изменение спектрального состава СВЧ-сигнала после его прохождения через плазму: значительное затухание низкочастотных составляющих спектра (до 400 МГц), а также обеднение спектра в высокочастотной области (400...750 МГц). Последнее свидетельствует о нелинейном характере взаимодействия мощного стохастического СВЧ-излучения с создаваемой им в разреженном газе плазмой.

## 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, вып.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. 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.
5. Ф. Ланге. *Корреляционная электроника*. М.: "Судпром", 1963.
6. А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. *Вопросы прикладного анализа случайных процессов*. М.: "Сов. Радио", 1968.
7. А. Мак-Дональд. *Сверхвысокочастотный пробой газов*. М.: "Мир", 1969.
8. Ю.П. Райзер. *Основы современной физики газоразрядных процессов*. М.: "Наука", 1980.

## GAS BREAKDOWN AND INITIATION OF A MICROWAVE DISCHARGE IN A LOW PRESSURE GAS BY PULSED MICROWAVE RADIATION WITH A STOCHASTICALLY JUMPING PHASE (I)

*V.I. Karas', A.F. Alisov, A.M. Artamoshkin, R. Bingham, V.I. Mirny, I.V. Gavrilenko, I.A. Zagrebelny, I.F. Potapenko, V.S. Us*

The results of theoretical and experimental studies for a gas breakdown and for the initiation of a microwave discharge in a low pressure gas by pulsed microwave radiation with a stochastically jumping phase and the peculiarities of a such wave propagation across plasmas that created by it have been presented. It is shown that a breakdown power minimum for microwaves with a stochastically jumping phase depends weakly on a working gas pressure at its increase from optimal (50 Pa for Ar) pressure that is caused the anomalous nature of collisionless electron heating, a weak diffusion of electrons and a diminution of losses connected with the elastic and nonelastic collisions between electrons and neutrals. This situation allows extending the discharge existence region in a direction of over pressures.

## ПРОБІЙ ТА ПІДТРИМАННЯ РОЗРЯДУ У ГАЗІ НИЗЬКОГО ТИСКУ НВЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯМ ЗІ СТОХАСТИЧНО СТРИБАЮЧОЮ ФАЗОЮ (I)

*В.І. Карась, А.Ф. Алісов, А.М. Артамошкін, Р. Бінгхам, В.І. Мирний, І.В. Гавриленко, І.А. Загребельний, І.Ф. Потаненко, В.С. Ус*

Приведені результати теоретичних і експериментальних досліджень пробую та підтримання розряду у розрідженому газі імпульсним НВЧ-випромінюванням зі стохастичними стрибками фази та особливостями проходження цього випромінювання крізь створену ним плазму. Показано, що для стохастичного НВЧ-випромінювання зі скачками фази мінімум пробійної потужності слабо залежить від тиску робочого газу

при його зменшенні від оптимального ( $\approx 50$  Па для аргону), що обумовлено ефективним беззіткненим нагріванням електронів, ослабленою дифузією та зниженням витрат на пружні і непружні зіткнення. Це дозволяє розширити область існування розряду у бік більш низьких тисків.