

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований пробоя в разреженном газе импульсным микроволновым излучением со стохастическими скачками фазы (МВИССФ) в различных режимах работы пучково-плазменного генератора.

УДК 533.9

А.Ф. Алисов,
А.М. Артамошкин, канд. физ. - мат. наук,
В.И. Голота, канд. физ. - мат. наук,
В.И. Карась, докт. физ. - мат. наук,
И.В. Карась, канд. физ. - мат. наук,
С.Н. Маньковский,
В.И. Мирный, канд. физ.-мат. наук,
Г.В. Таран, канд. техн. наук
 ННЦ «Харьковский физико - технический институт», НАУ Украины

Л.А. Назаренко, докт. техн. наук
 Харьковская национальная академия городского хозяйства

И.Ф. Потапенко, докт. физ. - мат. наук
 Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

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

Ранее было показано [1], что в МВИССФ эффективно осуществляется ускорение заряженных частиц и нагрев плазмы. Напомним, что при этом происходит обмен энергией между МВИССФ 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 МВИССФ, а приобретаемая частицей средняя за период энергия пропорциональна частоте скачков фазы. В работах [1-3] установлено, что аномальное поведение: коэффициента проникновения таких электромагнитных волн, условий пробоя ими газа, поддержания СВЧ-газового разряда и бесстолкновительного нагрева электронов связаны с прыжками фазы.

1. Введение

Как известно, в последнее время достигнуты большие успехи в развитии светотехники [1], однако, важная проблема о взаимодействии стохастического электромагнитного излучения с газами и спектры их оптического излучения пока не получила должного развития. Ранее было показано, что в стохастических электромагнитных полях могут эффективно осуществляться ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы [2-4] 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 [2-4].

2. Основная часть

2.1. Параметры пучково-плазменного генератора и генерируемого им 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.

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

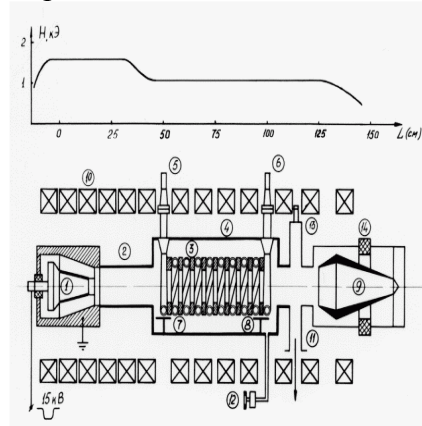


Рис. 1. Блок-схема генератора (внизу) и эпюра продольного распределения напряженности магнитного поля (вверху).

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 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. Стохастические СВЧ колебания, генерируемые в ППГ, с выхода замедляющей структуры через широкополосный коаксиальный ответвитель подавались на вход коаксиального волновода и далее через ответвитель регистрировались измерителем большой мощности типа ИБМ-2. Вход замедляющей структуры генератора подключался к согласованной нагрузке типа Э2-9 или к короткозамкателью. Ко вторичным плечам направленных ответвителей подключались ваттметры типа М3-54 и через аттенюаторы анализаторы спектра типа С4-60. К другим плечам этих ответвителей подключались коаксиальные нагрузки и через аттенюаторы коаксиального типа Д2-13 и аттенюаторы подключались к осциллографу типа С7-19. Синхронный запуск модулятора высокого напряжения, подаваемого на катод электронной пушки генератора, и осциллографа осуществлялась с помощью запускающего устройства. Используя устройство задержки, момент запуска осциллографа 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 $\approx 300 \div 550$ МГц (при этом ширина спектра составляет $250 \div 270$ 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) и анализатором спектра С4-60 – интегральный частотный спектр. Полученные реализации обрабатывались методами корреляционного анализа и определялись частотные спектры, зависимость фазы высокочастотных колебаний от времени и автокорреляционные функции. Установлено, что колебания на выходе пучково-плазменного генератора имеют совершенно различный характер при малых и больших токах электронного пучка. Для тока I_1 колебания практически синусоидальные с частотой ≈ 50 МГц, корреляционная функция очень слабо спадает со временем, скачков фазы практически не видно. Для токов I_2, I_3 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. Таким образом показано, что с ростом тока электронной пушки в ППГ время корреляции τ уменьшается. Так для режима, соответствующего $I_1 = 1.0$ А – $\tau \approx 6$ нс; $I_2 = 1.5$ А – $\tau \approx 4$ нс; $I_3 = 1.8$ А – $\tau \approx 1,8$ 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. 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.

2.2. 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 использовался 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. 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. 2 представлен график зависимости пороговой импульсной мощности стохастических СВЧ колебаний от давления рабочего газа.

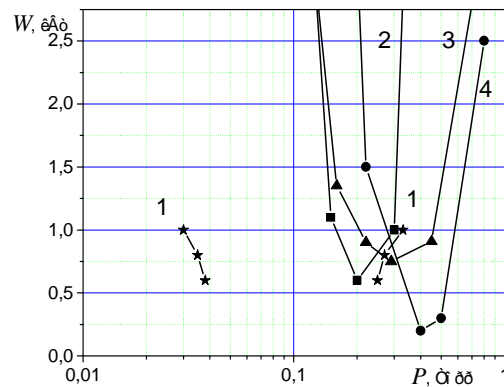


Рис. 2. Зависимости пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления рабочего газа при различных токах: кривая 1 – воздух (фиксированное напряжение, т.е. энергия электронов пучка в ППГ), кривая 2 – воздух, кривая 3 – аргон, 4 – гелий (нефиксированная энергия электронов пучка в ППГ).

На рис. 2 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 , отвечающих 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. 2 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.

Выводы

В режиме генерации «узкополосного» стохастического СВЧ-излучения были экспериментально определены пороговые значения мощностей, вызывающих пробой рабочего газа (воздух, аргон, гелий) в коаксиальном волноводе. Показано, что для МВИССФ 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. Следует отметить, что сорт газа (воздух, аргон, гелий) слабо влияет на зависимость пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления.

Литература

1. Справочная книга по светотехнике. /Под ред. проф. Ю.Б.Айзенберга. –М.: Знак, 2006.-972с.
2. В.И. Карась, Я.Б. Файнберг, А.Ф. Алисов и др. // Физика плазмы. 2005, т. 31, №9, с. 810-822.
3. В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин и др. // Вопросы атомной науки и техники, Серия. Плазменная электроника и новые методы ускорения (5). 2006, № 5, с. 54-58.
4. В.И. Карась, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин и др. // Вопросы атомной науки и техники, Серия. Физика плазмы (12). 2006, № 6, с. 163-165.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОРОГОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРОБЮЮ ВІД ТИСКУ ГАЗУ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА СВЧ - ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ СКАЧКАМИ ФАЗИ

А.Ф. Алісов, А.М. Артамошкін, В.І. Голота, В.І. Карась, І.В. Карась, С.Н. Маньковський, В.І. Мірний, Л.А. Назаренко, І.Ф. Потапенко, Г.В. Таран

У доповіді наведені результати експериментальних досліджень пробюю у розрідженому газі імпульсним мікрохвильовим випромінюванням зі стохастичними стрибками фази (МХВССФ) у різноманітних режимах роботи пучково-плазмового генератора. Раніше було показано [1], що у МХВССФ ефективно здійснюється прискорення заряджених частинок та нагрів плазми. Нагадаємо, що при цьому відбувається обмін енергією між МХВССФ та зарядженими частинками, незважаючи на відсутність парних зіткнень або синхронізму у русі частинок та поширенні електромагнітних полів. Роль частоти парних зіткнень при цьому відіграють випадкові стрибки фаз МХВССФ, а здобута частинкою середня за період енергія пропорційна частоті стрибків фаз. У роботах [1-3] встановлено, що аномальна поведінка: коефіцієнта проникнення таких електромагнітних хвиль, умов пробюю ними газу, підтримання НВЧ-газового розряду та беззіткненивий нагрів електронів зв'язані зі стрибками фази.

THE DEPENDENCE OF BREAKDOWN CAPACITY THRESHOLD ON PRESSURE OF GAS IN VARIOUS OPERATING REGIMES OF THE GENERATOR OF MICROWAVE - RADIATION WITH JUMPING PHASE

A.F. Alisov, A.M. Artamoshkin V.I. Golota, V.I. Crucian, I.V. Crucian, S.N. Mankovsky, V.I. Peace, L.A. Nazarenko, I.F. Potapenko, G.V. Taran

In the report results of experimental researches of breakdown in rarefied gas by pulse microwave radiation with stochastic jumps of phase (MWRSSJP) in various operating modes of the beam-plasma generator are resulted. It has been earlier shown [1], that in MWRSSJP acceleration of the charged particles and having heated plasmas is effectively carried out. We shall remind, that thus there is an exchange of energy between MWRSSJP and the charged particles, despite lacking pair impacts or synchronism in movement of particles and propagation of electromagnetic fields. A role of frequency of pair impacts thus play jumps of phases MWRSSJP, and average got by a particle for the period energy is proportional to frequency of jumps of a phase. In works [1-3] it is established, that abnormal behaviour: factor of penetration of such electromagnetic waves, conditions of breakdown by them of gas, maintenance of the microwave gas discharge and collisionless electron heating are connected to jumps of a phase.