

УДК 537.533

УКОРОЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА В ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ПО МЕТОДУ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов

В численной модели исследовано самопроизвольное укорочение импульса излучения черенковских СВЧ-генераторов, основанных на взаимодействии сильно-точного релятивистского электронного пучка с заранее созданной плазмой. Укорочение СВЧ-импульса вызывается появлением рядом с коллектором постепенно увеличивающейся области, из которой плазма вытесняется электростатическим полем релятивистских электронов. Отсутствие плазмы приводит к уменьшению в несколько раз коэффициента отражения плазменной волны от коллектора и нарушению условий самовозбуждения генератора. С ростом массы ионов плазмы длительность СВЧ-излучения увеличивается.

Ключевые слова: релятивистская электроника, плазменный СВЧ-генератор, метод крупных частиц (PIC).

Укорочение СВЧ-импульса (microwave pulse shortening) в приборах сильноточной релятивистской вакуумной СВЧ-электроники изучалось с начала 1980-х годов [1]. Явление заключается в том, что процесс излучения в СВЧ-генераторе самопроизвольно прекращается, несмотря на то, что электронный пучок продолжает идти через электродинамическую систему. Многочисленные причины укорочения СВЧ-импульса в вакуумных релятивистских СВЧ-генераторах [2] были найдены и изучены. Во всех случаях срыв процесса СВЧ-излучения был связан с появлением или изменением плазмы в различных частях СВЧ-генератора: на взрывоэмиссионном катоде [3], на входной диафрагме и коллекторе [4], в замедляющей структуре [5]. Создание поперечно-лезвийного

E-mail: loza@fpl.gpi.ru

взрывоэмиссионного катода [6] и асимметричного, удаленного из волноводного тракта коллектора [7], позволило исключить влияние катодной и коллекторной плазмы на длительность СВЧ-излучения, а также появления плазмы на анодной диафрагме. Тем не менее, срыва СВЧ-излучения вследствие появления плазмы в замедляющей структуре избежать не удастся, причем не только в случае мощной, высокоэффективной СВЧ-генерации [8], когда практически невозможно предотвратить СВЧ-разряд на стенке. Плазма появляется также и в замедляющей структуре вакуумных релятивистских СВЧ-генераторов со сравнительно малой эффективностью [9] вследствие разрушения электронного пучка в СВЧ-полях [10] и ухода части электронов на близко расположенную стенку.

Близость релятивистского электронного пучка (РЭП) к стенке волновода является неизбежной особенностью приборов вакуумной сильноточной электроники. Сильное, 10^5 В/см и более, электростатическое поле РЭП, определяющее потенциал пучка, препятствует увеличению расстояния между каналом транспортировки электронов и стенкой замедляющей структуры. Это обстоятельство делает практически неустраняемыми бомбардировку стенок волновода релятивистскими электронами и укорочение импульса излучения в приборах сильноточной релятивистской вакуумной СВЧ-электроники.

Снижение потенциала РЭП и увеличение расстояния между электронами и стенкой волновода возможно при экранировке пространственного заряда плазмой. В приборах плазменной релятивистской сильноточной СВЧ-электроники [11] трубчатые РЭП и плазма расположены коаксиально, что позволяет значительно увеличивать радиус волновода при неизменной геометрии РЭП и плазмы. Тем не менее, даже при существенно увеличенном расстоянии между каналом транспортировки электронов и стенкой в экспериментах с плазменными СВЧ-генераторами было замечено укорочение СВЧ-импульса, однако специальных экспериментальных исследований на эту тему не проводилось.

Единственная опубликованная работа [12], в которой анализируются причины укорочения СВЧ-импульса в плазменных релятивистских генераторах СВЧ-излучения (ПРГ) – это результат компьютерного моделирования с помощью электродинамического кода Карат [13]. В работе [12] рассматривалась 2.5-мерная модель ПРГ с пучком электронов с энергией 500 кэВ микросекундной длительности, где изначально холодные электроны плазмы представлялись крупными частицами (метод *particle-in-cell*, PIC), а ионы считались “замороженными”, т.е. не изменяли положения в течение всего времени расчета. Авторы [12] наблюдали срыв процесса СВЧ-излучения приблизительно-

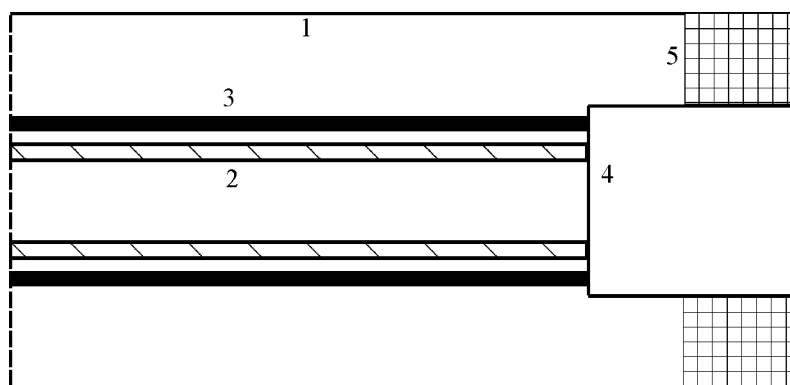


Рис. 1: Модель плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 – камера; 2 – релятивистский электронный пучок; 3 – плазма; 4 – коллектор; 5 – СВЧ-поглотитель.

но через 200 нс после начала процесса. Тогда же в энергетическом спектре электронов плазмы появлялась значительная доля частиц с энергиями до 150 кэВ. Авторы указывали, что условие черенковского синхронизма электронов РЭП с плазмой при наличии таких частиц нарушается, что и приводит к срыву СВЧ-генерации.

Подчеркнем, что наряду с микросекундными длительностями СВЧ-импульса ПРГ [14] в ряде экспериментов наблюдался срыв СВЧ-излучения через несколько десятков наносекунд при мощности порядка 10^8 Вт. Это обстоятельство и почти полное отсутствие исследований, посвященных проблеме укорочения СВЧ-импульса в плазменных релятивистских СВЧ-генераторах, послужило причиной выполнения данной работы.

Постановка задачи. Задача решалась с помощью кода “Карат” [13], модель ПРГ показана на рис. 1. Система аксиально-симметрична, однородное магнитное поле с индукцией 2 Тл направлено вдоль оси. В камеру 1 с проводящими стенками и радиусом 1.8 см слева инжектируется трубчатый РЭП 2 со средним радиусом 0.75 см и толщиной стенки 0.1 см. Трубчатая плазма 3 со средним радиусом 1.05 см и толщиной стенки 0.1 см расположена коаксиально РЭП. Проводящий коллектор 4 с радиусом 1.2 см, на котором оседает РЭП, электрически соединен с камерой 1 торцевой стенкой на правой границе. Длина плазменно-пучкового взаимодействия от левой границы до коллектора равна 15 см. Волны, распространяющиеся слева направо по коаксиальному волноводу, образованному коллектором и камерой, поглощаются в специальном неотражающем слое 5.

Как электроны, так и ионы, присутствующие в системе, моделируются крупными частицами. Плазма изначально состоит из электронов с температурой, соответствующей

энергии 5 эВ, и ионов одного сорта с той же температурой. Релятивистские электроны с энергией 500 кэВ “инжектируются” через левую границу и исчезают по достижении коллектора. Ток РЭП нарастает от 0 до 2 кА в течение 5 нс от начала процесса при неизменной энергии электронов. Кроме того, поверхность коллектора имеет свойство эмиссии электронов под действием электрического поля с напряженностью, большей 10 кВ/см. Таким образом, в системе задается 4 сорта крупных частиц, число которых можно найти в любой момент времени.

В начальный момент ионы и электроны плазмы с концентрацией 10^{13} см $^{-3}$ представлены крупными частицами, числом приблизительно по 150000 каждое. Ток 2 кА релятивистских электронов соответствует приблизительно 15000 соответствующих крупных частиц, одновременно находящихся в пучке.

Мощность излучения P в момент времени t получалась интегрированием вектора Пойтинга по сечению выходного коаксиального волновода, а энергия СВЧ-импульса получалась интегрированием мощности $P(t)$ по всей длительности процесса. Эффективная длительность СВЧ-импульса считалась равной отношению энергии к максимальной мощности излучения P_{\max} , т.е.

$$T = \frac{\int P(t)dt}{P_{\max}}. \quad (1)$$

Такое выражение для длительности импульса часто используется в эксперименте, когда мощность в относительных единицах измеряется СВЧ-детектором.

Как и в работе [12], рассматривалась 2.5-мерная $R-Z$ модель, т.е. в расчете учитывалось наличие азимутальных полей, но распределения частиц и полей считались однородными по азимуту. При таких допущениях время расчета процесса с длительностью 40 нс составляло несколько часов на ПК с тактовой частотой 3 ГГц. Длительность решения аналогичной задачи с помощью 3-мерной версии кода “Карат” превышает неделю.

При постановке задачи были сделаны упрощения модели по сравнению с реальными процессами. Как было упомянуто выше, пренебрегалось азимутальной неоднородностью системы. Отметим, что филаментация трубчатой плазмы в ПРГ [15] и генерация несимметричных по азимуту типов колебаний наблюдались экспериментально. В расчете пренебрегалось также процессами ионизации и рекомбинации нейтрального газа, присутствующего в системе: текущее количество ионов и электронов определялось только их появлением и исчезновением на границах. Учет указанных обстоятельств – неоднородности по азимуту и ионизации газа – увеличивает время расчета на один-два

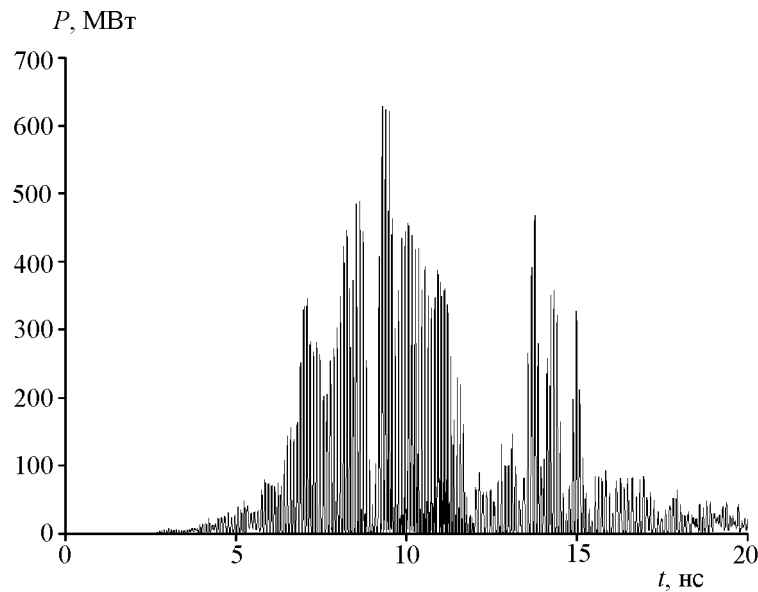


Рис. 2: Зависимость мощности СВЧ-излучения P от времени t : плазма гелия с концентрацией $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

порядка, а точность вычислений падает до недопустимого уровня.

Результаты расчетов. В теории плазменных релятивистских СВЧ-генераторов [16] ионы плазмы всегда считались неподвижными, т.е. бесконечно тяжелыми. Для более адекватного сравнения теории с экспериментом в реальных установках плазма создается ионизацией ксенона [15], т.е. самого тяжелого из доступных инертных и безопасных газов. Влияние сорта газа на параметры СВЧ-излучения ПРГ в известных нам источниках не описано, поэтому было проведено моделирование работы ПРГ с ионами различной массы. Расчеты проводились для однократно ионизированных молекул 4-х типов, а именно, гелия, азота, криптона и ксенона. Массы этих ионов, выраженные в атомных единицах массы, соответственно равны 4, 28, 84 и 131.

На рис. 2 показана типичная зависимость мощности СВЧ-излучения ПРГ от времени, в данном случае – с гелиевой плазмой, начальная концентрация которой была равна $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Излучение происходит на частоте около 10 ГГц, его эффективная длительность T в соответствии с ф.(1) равна 6 нс, средняя мощность равна приблизительно 160 МВт, т.е. энергия в импульсе 0.9 Дж. Обращает на себя внимание периодический рост и спад мощности. Подобные зависимости были получены и для оставшихся трех сортов ионов, при этом плотность плазмы и другие параметры ПРГ были одинаковыми. Оказалось, что в течение процесса СВЧ-излучения его частота ме-

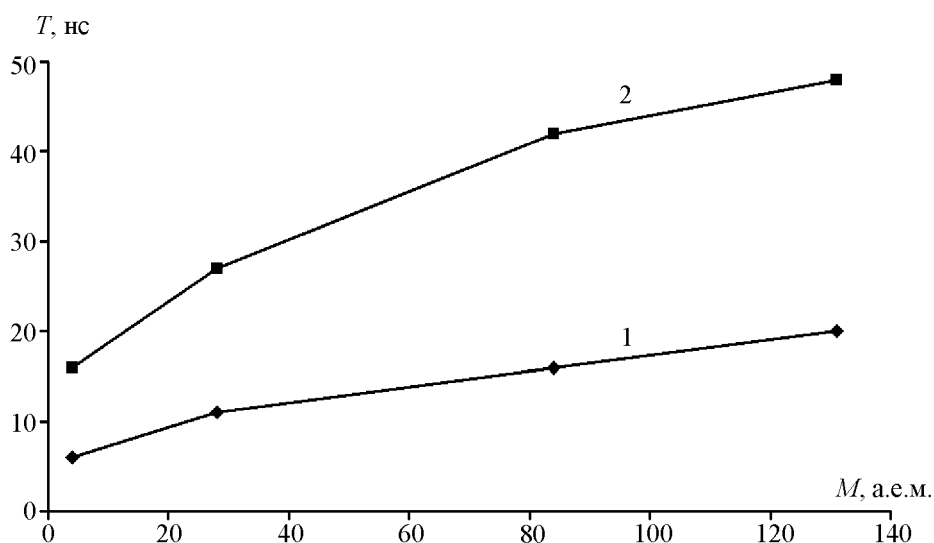


Рис. 3: Зависимости эффективной длительности СВЧ-излучения (1) и момента срыва СВЧ-генерации (2) от массы ионов плазмы с концентрацией $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

няется. Излучение ПРГ, иллюстрированное на рис. 2, начинается на частоте 10.3 ГГц и продолжается приблизительно до момента времени 12 нс, когда мощность падает почти до нуля. После этого мощность излучения снова растет, но частота уже другая, а именно, 9.2 ГГц.

На рис. 3 приведен график зависимости эффективной длительности излучения ПРГ, рассчитанной по ф.(1), от массы ионов, входящих в состав плазмы. С ростом массы иона эффективная длительность процесса СВЧ-излучения растет, достигая 20 нс при использовании ксенона. Во всех случаях излучение происходило на частоте около 10 ГГц, а мощность была приблизительно равна 180 МВт. Здесь же приведены данные о моменте окончания СВЧ-излучения, которое для всех сортов ионов начиналось (достигало заметной мощности) через 6–7 нс после начала процесса.

Код “Карат” предоставляет возможность отслеживать изменение многих параметров системы, в том числе распределения частиц разных сортов. На рис. 4 показано изменение с течением времени суммированного по длине радиального профиля плотности ионов для плазмы криптона. В течение 40 нс стенка плазменной трубки с толщиной 1 мм расширяется по радиусу, максимальная концентрация ионов уменьшается вдвое, но при этом заметно радиальное движение ионов, особенно в сторону оси, т.е. по направлению к каналу транспортировки РЭП. Похожим образом ведет себя и радиальное

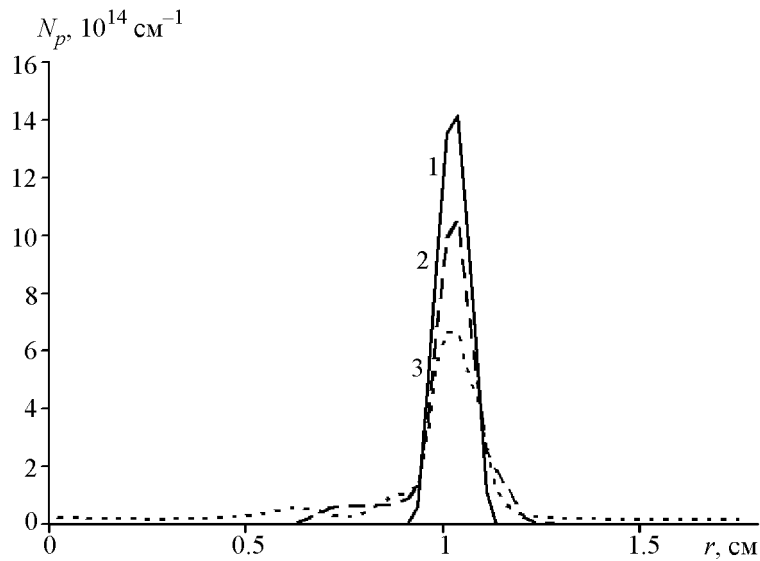


Рис. 4: Интегральные по длине СВЧ-генератора радиальные профили плотности N_p ионов плазмы криптона для геометрии ПРГ, изображенной на рис. 1: 1 – 0 нс; 2 – 20 нс; 3 – 40 нс.

распределение электронов плазмы, т.е. частиц, определяющих ленгмюровскую частоту и, в конечном счете, частоту и эффективность плазменно-пучкового взаимодействия. Максимум концентрации электронов также уменьшается вдвое при увеличении толщины плазменной трубки, но оказывается, что уменьшается и общее число электронов, что будет проиллюстрировано ниже.

Конструкция ПРГ, показанная на рис. 1, не является единственно возможной. Первый экспериментальный ПРГ [17] и некоторые другие версии были построены по схеме, в которой трубчатая плазма и РЭП коаксиальны, но плазма находится внутри электронного пучка. На рис. 1 это соответствует ситуации, когда плазма и РЭП меняются местами. Изменение радиального профиля плотности ионов в течение длительности импульса для ПРГ с описанной выше инверсной геометрией, когда электронный пучок окружает плазму, показано на рис. 5. Как и на рис. 4, максимальная концентрация плазмы снижается со временем, однако фронт радиального потока ионов заметно движется не только к оси системы, но также и к стенке камеры.

Расчеты ПРГ с инверсной геометрией, результаты которых представлены на рис. 5, были связаны со следующей гипотезой. Предполагалось, что радиальное движение ионов плазмы к оси ПРГ, показанного на рис. 1, вызвано только электроста-

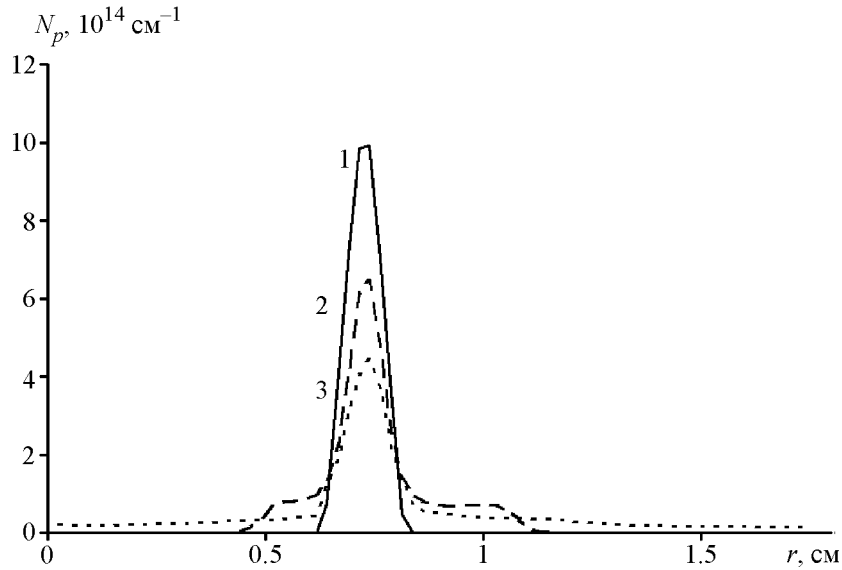


Рис. 5: Интегральные по длине радиальные профили плотности N_p ионов плазмы криптона для СВЧ-генератора с инверсной геометрией: 1 – 0 нс; 2 – 20 нс; 3 – 40 нс.

тическим полем РЭП. Снижение концентрации ионов приводит к соответствующему движению электронов плазмы, снижению ее плотности и, в конечном счете, к срыву СВЧ-генерации. Отсутствие причины движения частиц, т.е. воздействия на плазму со стороны электростатического поля РЭП, в ПРГ с инверсной геометрией может устранить причину укорочения СВЧ-импульса. Эта гипотеза, однако, оказалась несостоятельной, основной причиной радиального движения ионов плазмы оказался дрейф в скрещенных СВЧ-полях: азимутальном магнитном B_φ и продольном электрическом E_z поперек ведущего магнитного поля B_0 . На рис. 6 показаны типичные зависимости указанных компонентов электрического и магнитного полей в течение 0.3 нс. Среднее значение дрейфовой скорости $\nu_{dr} = c \frac{E_z \times B_\varphi}{B_0^2}$ имеет порядок 10^6 см/с. В ПРГ с инверсной геометрией радиальный профиль плотности плазмы деградирует не меньше, чем при расположении РЭП внутри плазмы, укорочение СВЧ-импульса не устраняется, поэтому в дальнейшем инверсная геометрия ПРГ более не рассматривается.

Существенной особенностью плазменно-пучковых систем, использующих сильноточные РЭП, является эмиссия электронов с коллектора. Фронт тока РЭП, инициирующий обратный ток в плазме, а также сильные СВЧ-поля на коллекторе вызывают эмиссию электронов с его поверхности. Код “Караг” позволяет различать электроны, эмиттированные с коллектора, и электроны, изначально присутствовавшие в плазме до начала

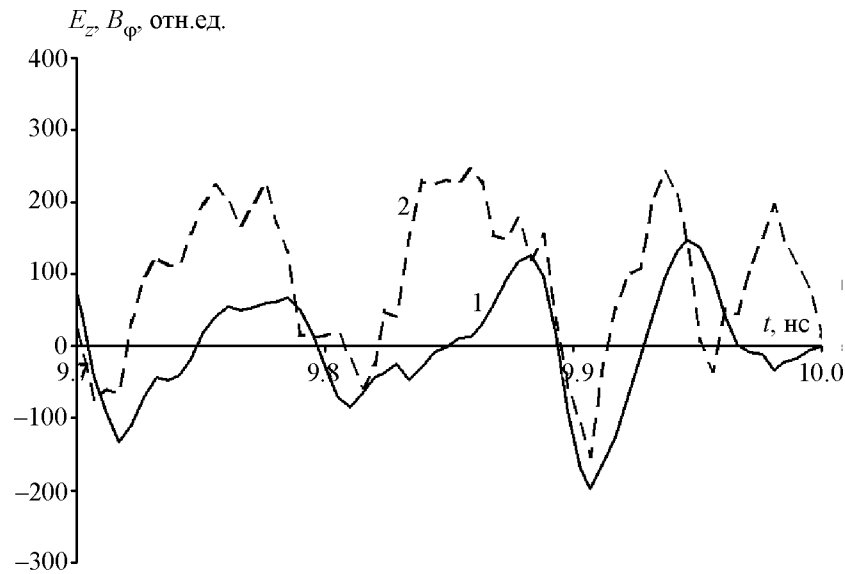


Рис. 6: СВЧ-поля на внутренней по радиусу границе плазмы. 1 – продольное электрическое поле E_z ; 2 – азимутальное магнитное поле B_φ .

процесса, хотя физически эти электроны идентичны и все взаимодействуют с РЭП.

На рис. 7 показано распределение погонной плотности электронов по длине СВЧ-генератора с плазмой гелия (см. рис. 2), причем здесь учитываются электроны обеих групп. В течение 15 нс, т.е. к моменту прекращения излучения (см. рис. 3) средняя по длине погонная плотность электронов уменьшается приблизительно на 20% от 10^{13} см^{-1} до $0.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$. Обращает на себя внимание и другая особенность графика на рис. 7, а именно, наличие областей значительного снижения плотности частиц в непосредственной близости от границ: плоскости инжекции РЭП слева и коллектора справа. На рис. 7 видно, что ширина этих областей увеличивается и после окончания СВЧ-импульса, который для плазмы гелия прервался через 16 нс после начала. Аналогичные зависимости были получены для четырех сортов ионов плазмы с интервалом 5 нс. Рост со временем ширины областей с пониженной плотностью плазмы (по высоте) около коллектора для различных ионов плазмы показан на рис. 8. Здесь же на соответствующих графиках обозначены и моменты окончания СВЧ-импульсов. Видно, что скорость расширения этих областей падает с ростом массы ионов, но срыв процесса СВЧ-излучения всегда наступает, когда длина зазора между плазменной трубкой и коллектором достигает 6–7 мм.

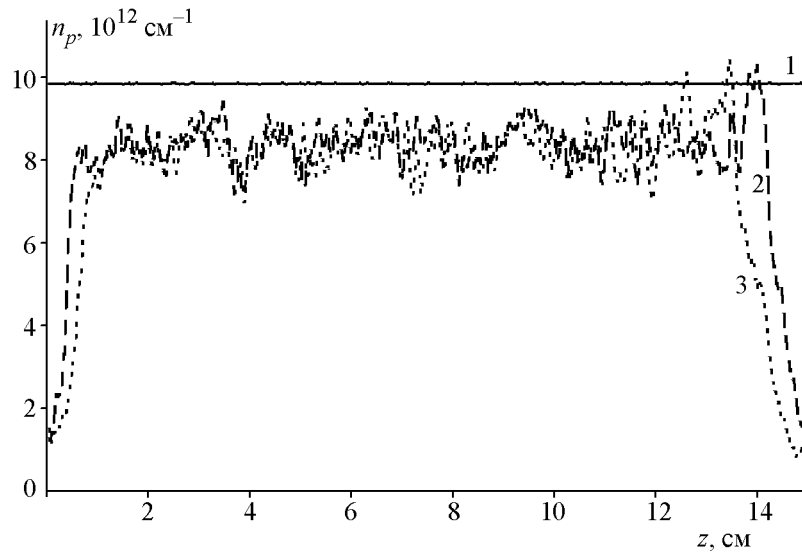


Рис. 7: Распределение погонной плотности электронов n_p по длине СВЧ-генератора: 1 – 0 нс; 2 – 15 нс; 3 – 25 нс.

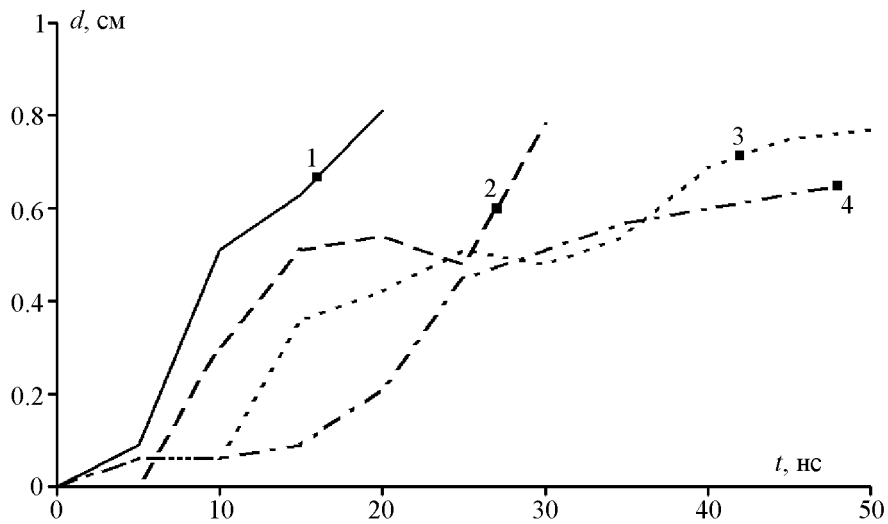


Рис. 8: Изменение со временем t ширины d области у коллектора с пониженной концентрацией плазмы для 4 сортов ионов: 1 – гелий; 2 – азот; 3 – криптон; 4 – ксенон. Ромбами указаны моменты окончания СВЧ-излучения.

Обсуждение результатов. Приведенные выше результаты моделирования показывают, что в течение нескольких (десятков) наносекунд плазма претерпевает изменения, оказывающие существенное влияние на процесс СВЧ-излучения ПРГ. В первую очередь, это влияние проявляется в укорочении СВЧ-импульса (см. рис. 2), которое реализуется, так или иначе, при любых реальных параметрах ПРГ. Заметим, что при моделировании плазмы в предположении очень тяжелых (неподвижных) ионов эффект укорочения СВЧ-импульса в настоящих расчетах не наблюдался по крайней мере в течение 100 нс.

Механизм укорочения СВЧ-импульса связан с изменением свойств плазмы. Электроны плазмы и электроны, эмиттированные с коллектора, определяют мощность и частоту волны, возникающей при черенковском взаимодействии с электронами РЭП. Однако длительность СВЧ-импульса зависит от геометрии плазмы, динамика которой определяется массой ионов (см. рис. 3).

Пространственное распределение электронов существенно зависит от положения ионов, нейтрализующих их заряд. Дрейфовое движение ионов по радиусу происходит в СВЧ-полях со скоростью $\sim 10^6$ см/с, примерно так же изменяется и распределение по радиусу электронов. Отметим, что фазовые соотношения между магнитным и электрическим СВЧ-полями (см. рис. 6) различны на внутренней и внешней границе плазмы, благодаря этому ионы удаляются от плазмы в ПРГ как обычной (рис. 1), так и инверсной геометрии (см. рис. 4 и 5). Здесь можно заметить, что при обычной геометрии ПРГ электростатическое поле РЭП препятствует до некоторого времени разлету ионов к стенке волновода, тогда как при инверсной геометрии ионы разлетаются в обе стороны от плазменного слоя.

Радиальный профиль плотности электронов определяется в основном не их дрейфом поперек магнитного поля, а граничными эффектами: эмиссией электронов на коллекторе в сильных СВЧ-полях и исчезновением при достижении левой или правой границы – и их распространением вдоль магнитных силовых линий. Электроны активно перемещаются вдоль линий магнитного поля, например, при прохождении фронта РЭП и появлении некомпенсированного пространственного заряда. Часть электронов уходит в течение ~ 10 нс на границу плазмы, погонная плотность которой снижается (см. рис. 7), что вызывает изменение продольной моды колебаний [18]. По этой причине наблюдается смена частоты излучения от 10.3 ГГц до 9.2 ГГц в течение импульса, изображенного на рис. 2.

Расчеты показали, что динамика радиального профиля плотности электронов плазмы напоминает динамику профиля плотности ионов (см. рис. 4), поэтому специальной иллюстрации этого факта здесь не приводится. Максимальная плотность электронов уменьшается с течением импульса, а радиальная толщина увеличивается, стремясь скомпенсировать заряд ионов и РЭП. Поскольку на частоту излучения в значительной степени влияет именно погонная плотность плазмы [16], а не ее максимальное по радиусу значение, то частота излучения почти не меняется, начиная с какого-то времени в течение импульса.

Интересной особенностью ПРГ является обнаруженная неоднородность распределения плазмы по длине (см. рис. 7), а именно, две области почти полного отсутствия плазмы на левой и правой границах пространства плазменно-пучкового взаимодействия. Продольный размер этих областей растет со временем, а скорость роста тем меньше, чем тяжелее ионы плазмы. О происхождении таких почти свободных от плазмы промежутков можно догадаться, если вспомнить, что они совпадают с областями торможения (слева) и ускорения (справа) электронов РЭП. Действительно, электроны релятивистского пучка благодаря пространственному заряду имеют потенциал порядка нескольких десятков киловольт везде, кроме плоскости инжекции слева на рис. 1 и коллектора справа, где их кинетическая энергия максимальна. Изменение скорости релятивистских электронов обеспечивается соответствующей конфигурацией силовых линий электростатического поля РЭП, а именно, наличием продольного компонента на левой и правой границах. Это продольное электрическое поле с напряженностью ~ 100 кВ/см воздействует также и на частицы плазмы, заставляя ионы двигаться к середине системы и прижимая электроны к металлическим границам, где они исчезают. Плотность ионов в приграничных по длине областях снижается, позволяя снижаться и плотности компенсирующих их заряд электронов.

Промежуток между краем плазменного цилиндра и коллектором растет тем быстрее, чем легче ионы, что иллюстрирует рис. 8. Тем не менее, когда длина этого промежутка достигает 6–7 мм, СВЧ-излучение прекращается независимо от массы ионов плазмы, на рис. 8 этот момент отмечен на всех кривых, соответствующих ионам разной массы.

Для выяснения механизма этого явления были проведены расчеты коэффициента отражения плазменной волны от коллектора для разных длин промежутка между краем плазменного цилиндра и коллектором при отсутствии РЭП. СВЧ-импульс с длительностью ~ 3 нс на частоте генерации ПРГ (~ 10 ГГц) возбуждал плазменную волну

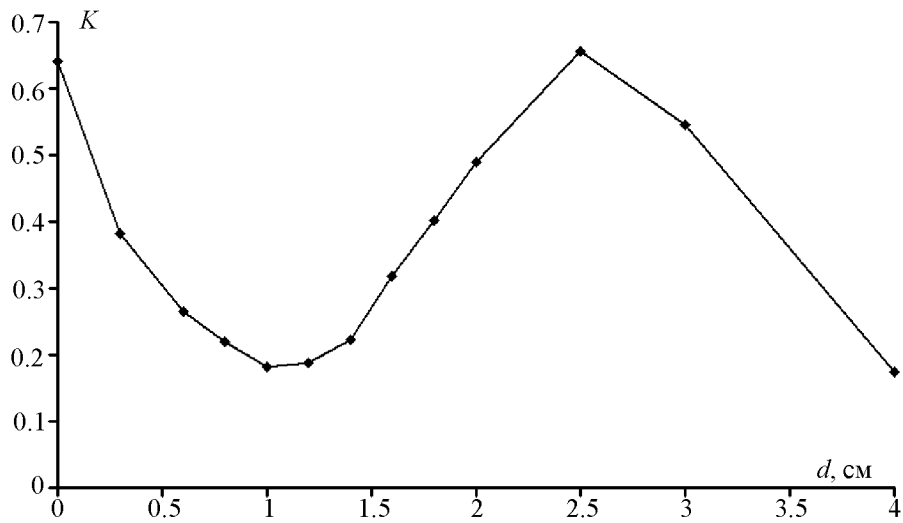


Рис. 9: Коэффициент отражения K плазменной волны от коллектора в зависимости от длины d промежутка между краем плазменного цилиндра и коллектором.

на левой границе (см. рис. 1) и распространялся в сторону коллектора, где частично отражался. Длина системы выбиралась достаточно большой, чтобы возбуждаемую и отраженную волны можно было наблюдать по отдельности. По отношению амплитуд отраженной и прямой волн определялся коэффициент отражения, результаты показаны на рис. 9. С увеличением промежутка между плазмой и коллектором от нуля до ~ 1 см коэффициент отражения падает от 0.64 до 0.18, т.е. более чем в 3.5 раза, а отраженная мощность уменьшается более чем на порядок.

Таким образом, рассмотренный механизм укорочения СВЧ-импульса в ПРГ сводится, вкратце, к следующему. Электростатическое поле РЭП вызывает уход плазмы из области, непосредственно граничащей с коллектором. Продольный размер этой области, где концентрация плазмы уменьшается на порядок, растет с течением времени. По этой причине происходит постепенное уменьшение коэффициента отражения плазменной волны в несколько раз, нарушаются условия самовозбуждения генератора, и процесс СВЧ-генерации прерывается. Длина плазменно-пучкового взаимодействия также постепенно уменьшается, снижая суммарное усиление попутной релятивистским электронам волны, но это уменьшение не столь существенно, как нарушение обратной связи в генераторе.

В настоящей работе описаны результаты первого численного моделирования плазменного релятивистского СВЧ-генератора, где не только электроны, но и ионы пред-

ставлены “крупными частицами”, обладающими конечной массой и движущимися под действием электромагнитных полей. Такой подход позволил впервые в численном моделировании ПРГ получить эффект окончания СВЧ-излучения через ~ 10 нс после начала взаимодействия плазмы и релятивистского электронного потока.

Показано, что СВЧ-поля приводят к деградации радиального профиля плотности заранее созданной плазмы. Частота СВЧ-излучения уменьшается в течение СВЧ-импульса, но к моменту срыва СВЧ-излучения может быть намного больше минимально возможной (критической) величины.

Причиной укорочения СВЧ-импульса в условиях описанного численного эксперимента является появление рядом с коллектором постепенно увеличивающейся области, из которой плазма вытесняется электростатическим полем РЭП. Отсутствие плазмы приводит к уменьшению в несколько раз коэффициента отражения плазменной волны от коллектора, к нарушению условий самовозбуждения генератора и срыву СВЧ-излучения. С ростом массы ионов плазмы длительность СВЧ-излучения увеличивается.

Заметим, что компенсация слабеющей обратной связи в генераторе ростом усиления за счет увеличения длины плазменно-пучкового взаимодействия является крайне нежелательным с точки зрения поддержания определенного спектра частот излучения [18]. В ходе расчетов было обнаружено, что определенное изменение формы коллектора позволяет в несколько раз увеличить длительность СВЧ-импульса ПРГ, но детальное изучение таких возможностей является предметом следующих исследований.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц, генерации электромагнитного излучения в импульсных системах большой мощности”. Авторы благодарны В. П. Тараканову за консультации по использованию кода “Карат”, а также А. А. Рухадзе и П. С. Стрелкову за полезные обсуждения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Ф. С. Ельчанинов, Ф. Я. Загулов, С. Д. Коровин и др., Письма в ЖТФ **7**(19), 1168 (1981).
- [2] J. Benford and G. Benford, IEEE Trans. on Plasma Sci. **25**(2), 311 (1997).
- [3] С. Н. Воронков, О. Т. Лоза, П. С. Стрелков, Физика плазмы **17**(6), 751 (1991).
- [4] Н. И. Зайцев, Н. Ф. Ковалев, Г. С. Кораблев и др., Письма в ЖТФ **7**(14), 879 (1981).
- [5] О. Т. Лоза, П. С. Стрелков, С. Н. Воронков, Физика плазмы **20**(4), 417 (1994).
- [6] О. Т. Лоза, ЖТФ **78**(11), 93 (2008).
- [7] С. Н. Воронков, О. Т. Лоза, П. С. Стрелков, Физика плазмы **19**(4), 601 (1993).

- [8] N. F. Kovalev, V. E. Nechaev, M. I. Petelin, and N. I. Zaitsev, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**(3), 246 (1998).
- [9] О. Т. Лоза, *РиЭ* **54**(7), 840 (2009).
- [10] С. П. Бугаев, М. П. Дейчули, В. И. Канавец и др., *РиЭ* **29**(3), 557 (1984).
- [11] М. В. Кузелев, О. Т. Лоза, А. А. Рухадзе и др., *Физика плазмы* **27**(8), 710 (2001).
- [12] I. L. Bogdankevich, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and V. P. Tarakanov, *Problems of Atomic Science and Technology*, **1**: Plasma Physics (9), 102 (2003).
- [13] V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992).
- [14] О. Т. Лоза, P. S. Strelkov, and I. E. Ivanov, *IEEE Trans. on Plasma Science* **26**(3), 336 (1998).
- [15] О. Т. Лоза, А. В. Пономарев, П. С. Стрелков и др., *Физика плазмы* **23**(3), 222 (1997).
- [16] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, П. С. Стрелков, *Плазменная релятивистская СВЧ-электроника: Учеб. пособие для вузов*. Под ред. А. А. Рухадзе. (Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2002).
- [17] М. В. Кузелев, Ф. Х. Мухаметзянов, М. С. Рабинович и др., *ЖЭТФ* **83**, 1358 (1982).
- [18] И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов, *Физика плазмы* **35**(3), 211 (2009).

Учреждение Российской академии наук

Институт общей физики

им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 13 ноября 2009 г.