

УДК 533.932

МЕХАНИЗМ УКРОЧЕНИЯ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

С. Е. Ернылева, И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза

В численных расчетах по методу крупных частиц исследованы причины срыва излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора. Найден механизм процесса, при котором граница плазмы удаляется от края коаксиального коллектора со скоростью более 10^7 см/с. В образующемся зазоре с коллектора генерируется поток электронов с энергией $\sim 10^5$ эВ и током $\sim 10^3$ А, нагревающий плазму и увеличивающий ее потенциал. СВЧ-генерация прекращается вследствие кратного уменьшения коэффициента отражения волн от коллектора. Применение полого коллектора предположительно является способом предотвращения срыва СВЧ-генерации.

Ключевые слова: СВЧ-генератор, плазменный, укорочение.

Введение. Самопроизвольный срыв излучения в СВЧ-генераторах [1], обнаруженный на ранней стадии развития сильноточной релятивистской СВЧ-электроники, был назван впоследствии [2] явлением укорочения СВЧ-импульса. Многочисленные причины этого явления были изучены и, в значительной мере, устранены. Главной и непреодолимой полностью причиной укорочения СВЧ-импульса в приборах вакуумной релятивистской СВЧ-электроники остается пробой на стенке замедляющей структуры генератора. Этот пробой вызывается непосредственно сильным СВЧ-полем [3] или инициируется развалом сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) и бомбардировкой стенок релятивистскими электронами [4]. Так или иначе, пробой стимулируется обязательной близостью РЭП к стенке волновода, частично диктуемой поверхностным характером поля замедленной волны в черенковских приборах, но, главное – наличием большого пространственного заряда РЭП. Этот последний фактор не позволяет увеличить расстояние от стенки волновода до сильноточного потока электронов без существенного роста его потенциальной и падения кинетической энергии.

ИОФ РАН, Россия 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: loza@jpl.gpi.ru

В устройствах плазменной релятивистской СВЧ-электроники [5] указанный недостаток – обязательная близость РЭП к стенке волновода – отсутствует. Экранировка электростатического поля РЭП плазмой и структура поля медленной плазменной волны позволяют устранить возможность СВЧ-пробоя на стенке волновода. Тем не менее, укорочение СВЧ-импульса наблюдалось в большинстве экспериментов с плазменными релятивистскими генераторами СВЧ-импульсов (ПРГ) даже при сравнительно небольшой мощности излучения 50 МВт [6]. Численный эксперимент [7] позволил смоделировать сокращение длительности СВЧ-импульса в ПРГ. Было обнаружено, что между плазмой и коллектором образуется и быстро (со скоростью $> 10^7$ см/с) растет вакуумный зазор, коэффициент отражения волны падает в несколько раз, и нарушаются условия автогенерации. Причины этого явления в работе [7] указаны не были.

Косвенным подтверждением того, что именно обратная связь в системе существенно уменьшается со временем, могут служить результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского СВЧ-усилителя [8]. В отличие от генератора, обратная связь в усилителе мешает работе, так что падение коэффициента отражения должно положительно сказываться на работе. Действительно, на рис. 3(в) и 4(в) в работе [8] показано, что в начале выходного СВЧ-импульса усилителя регистрируется излучение на частотах, отличных от частот входного сигнала, и только через некоторое время включается режим усиления.

Продолжение исследований [7], т.е. нахождение причин описанной выше деградации профиля плотности плазмы как фактора, вызывающего укорочение СВЧ-импульса в ПРГ, было целью настоящей работы.

Численная модель. Моделирование проводилось с помощью электродинамического кода Карат [9] – полностью электромагнитного нестационарного вычислительного кода с использованием метода крупных частиц (particle-in-cell, PIC-метод). Использовалась так называемая 2.5-мерная RZ-версия кода Карат. Это название означает, что в расчете учитывалось наличие всех трех компонент полей, но распределения частиц и полей изменялись по радиусу r и длине z , оставаясь однородными по азимуту. Процессы ионизации и рекомбинации не рассматривались, текущее количество ионов и электронов определялось только их появлением и исчезновением на границах.

Схема расчетной модели ПРГ показана на рис. 1. Система аксиально-симметрична, однородное магнитное поле с индукцией 2 Тл направлено вдоль оси. В камеру с проводящими стенками и радиусом 1.8 см слева инжектируется трубчатый РЭП со средним радиусом 0.75 см и толщиной стенки 0.1 см. Трубчатая плазма со средним радиусом

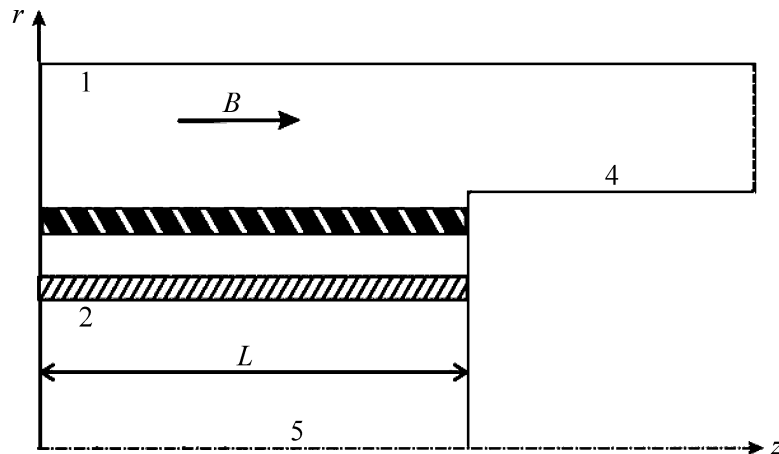


Рис. 1: Схема расчетной модели плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 – камера; 2 – релятивистский электронный пучок; 3 – плазма; 4 – коллектор; 5 – ось симметрии.

1.05 см и толщиной стенки 0.1 см, расположена коаксиально РЭП. Проводящий коллектор с радиусом 1.2 см, на котором оседает РЭП, электрически соединен с камерой торцевой стенкой на правой границе. Длина плазменно-пучкового взаимодействия от левой границы до коллектора L равна 15 см или 5 см, это оговорено ниже.

Электроны и ионы, присутствующие в системе, моделируются крупными частицами. Начальная температура электронов и ионов плазмы 5 эВ. Моделируемый газ – криптон, влияние сорта газа на процесс было исследовано в [7]. Релятивистские электроны с энергией 500 кэВ “инжектируются” через левую проводящую границу и исчезают по достижении коллектора или любой другой границы. Ток РЭП линейно нарастает от 0 до 2 кА за 5 нс, после чего не меняется. Торцевая часть поверхности коллектора имеет свойство эмиссии электронов под действием электрического поля с напряженностью большей 10 кВ/см. Изменение этого параметра в широких пределах, как оказалось, почти не влияет на результаты.

Таким образом, в системе имеются 4 сорта крупных частиц, а именно, ионы и электроны трех фракций: электроны РЭП, электроны заранее приготовленной плазмы и электроны, эмиттированные с коллектора. Все электроны программно “окрашены” в зависимости от происхождения, т.е. код “Карат” позволяет следить отдельно за электронами каждой фракции. Для плазмы с концентрацией $1.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ число “крупных” ионов и электронов в начальный момент равно $3 \cdot 10^5$. Ток 2 кА релятивистских электронов соответствует приблизительно $3 \cdot 10^4$ частиц, одновременно находящихся в пучке.

Отдельное внимание уделялось тому, чтобы в сфере с дебаевским радиусом плазмы содержалось достаточно крупных частиц. На начальной фазе процесса, пока температура электронов плазмы была невысокой, это условие было достаточно трудно соблюсти, поскольку это требовало значительных ресурсов памяти и времени расчета. В дальнейшем, по мере значительного нагрева электронов плазмы (что будет показано ниже) и роста дебаевского радиуса изначально жесткие требования выполнялись с большим запасом. Указанные выше числа крупных ионов и электронов (PIC) оказались достаточными, их увеличение практически не влияло на конечные результаты расчетов.

Результаты расчетов. Поиск причин удаления границы плазмы от коллектора показал, что такое движение может происходить без включения СВЧ-генератора и без СВЧ-полей на выходе, т.е. на правой границе. В этой серии расчетов длина L (см. рис. 1) была выбрана равной 5 см, что меньше пороговой величины для автогенерации СВЧ электронами РЭП.

В описанной модели коаксиальный коллектор с бесконечно большой длиной имеет волновое сопротивление 24 Ом, поэтому при прохождении тока РЭП, равного 2 кА, потенциал коллектора приближается к -50 кВ. В реальном эксперименте проводники, соединяющие коллектор с корпусом, имеют индуктивность $\sim 10^{-8} \dots 10^{-7}$ Гн, при прохождении фронта тока РЭП эта индуктивность обеспечивает коллектору отрицательный потенциал того же порядка величины. Дебаевский радиус плазмы с концентрацией $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ равен в начале процесса $6 \cdot 10^{-4}$ см и растет с увеличением температуры плазмы. Электростатическое поле с максимальной напряженностью $\sim 10^6$ В/см проникает в плазму, притягивая ионы к коллектору.

На рис. 2 показано, как сразу после начала инжекции РЭП и роста отрицательного потенциала коллектора ионы плазмы постепенно, слой за слоем уходят от границы плазмы, по пути ускоряются и исчезают на поверхности коллектора. Одновременно с поверхности коллектора эмиттируются электроны, которые ускоряются в зазоре между коллектором и границей плазмы до энергий в несколько десятков кэВ. Взаимная компенсация зарядов встречных потоков эмиттированных электронов и ионов позволяет ионному току достигать ~ 10 А, а электронному – 10^3 А. Таким образом, за счет ухода ионов граница плазмы отодвигается от коллектора со скоростью более 10^7 см/с, что и было обнаружено в [7]. Отметим, что электроны эмиттируются с коллектора на радиусах больших, равных и меньших радиуса плазмы, т.е. везде, где напряженность электростатического поля превышает выбранный порог эмиссии.

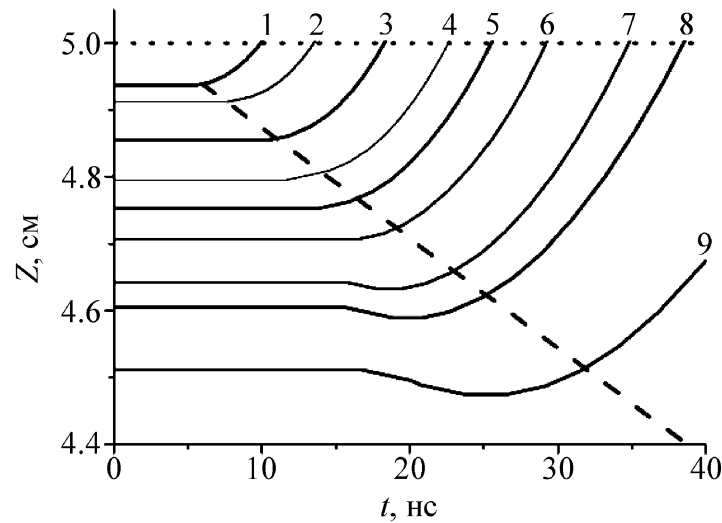


Рис. 2: Движение к отрицательно заряженному коллектору ионов плазмы с разными начальными координатами. 1–9 – номера ионов. Наклон пунктирной линии показывает скорость движения границы плазмы.

Описанную причину движения границы плазмы, т.е. отрицательный потенциал коллектора, в численном эксперименте можно нейтрализовать, искусственно назначив проводнику потенциал нужной величины. На рис. 3 показано, как граница плазмы движется при различных потенциалах коллектора. Видно, что при небольшом положительном потенциале смещение границы плазмы в течение нескольких десятков наносекунд практически отсутствует.

Увеличение длины плазменно-пучкового взаимодействия выше порогового значения, в данном случае до $L = 15$ см, включает механизм генерации СВЧ. Появление на коллекторе СВЧ-полей с напряженностью до 0.7 МВ/см также вызывает движение границы плазмы. На рис. 4 видно, что даже при положительном потенциале коллектора СВЧ-поля приводят к быстрому увеличению зазора между коллектором и плазмой, скорость его роста достигает $2 \cdot 10^7$ см/с. Механизм увеличения зазора в СВЧ-поле примерно такой же, как и в электростатическом поле коллектора. Разница заключается в том, что при одном направлении поля осуществляется эмиссия электронов с коллектора и гибель ионов на его поверхности, а в противоположной фазе происходит преимущественно поляризация плазмы. В результате движения границы плазмы генерация СВЧ прекращается приблизительно через 30 нс после начала процесса. Таким образом, принудительное выравнивание электростатического потенциала коллектора

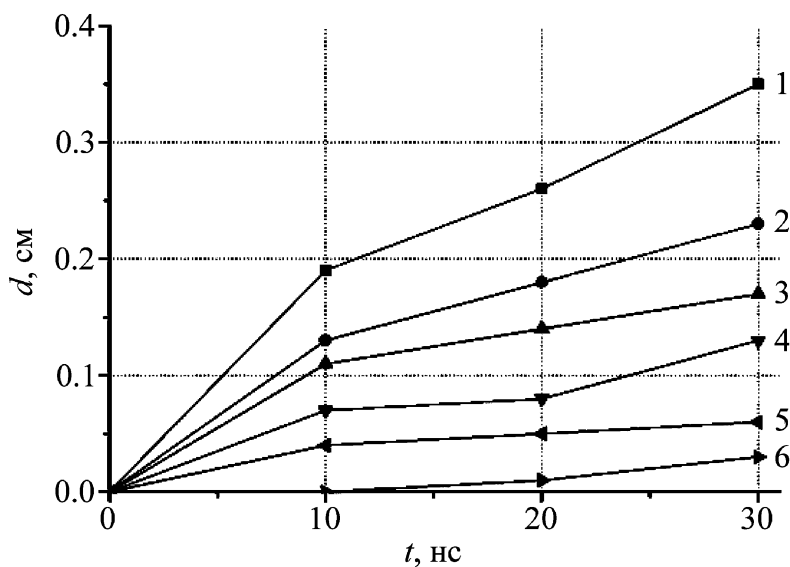


Рис. 3: Зависимость величины зазора между плазмой и коллектором от времени в отсутствие СВЧ при разном потенциале коллектора: 1— $U = -50$ kV; 2— $U = -25$ kV; 3— $U = -15$ kV; 4— $U = -5$ kV; 5— $U = 5$ kV; 6— $U = 15$ kV.

до практически реализуемого уровня не помогает в достижении конечного результата, т.е. существенном увеличении длительности процесса СВЧ-излучения.

Интенсивная эмиссия электронов с коллектора приводит к появлению мощного электронного потока. Ниже приведены результаты расчетов системы с длиной $L = 5$ см, т.е. без включения автогенерации СВЧ-излучения электронами РЭП. На рис. 5(а) показана зависимость продольного импульса частиц $p_z(z)$ от их координаты z , т.е. фазовый портрет эмиттированных с коллектора электронов, через 25 нс после начала процесса. Здесь продольный импульс электронов p_z нормирован на mc , где m — масса электрона, c — скорость света. Отметим сразу, что значения поперечного импульса лишь у незначительной части электронов превышает $0.05 \cdot mc$, что позволяет достаточно корректно сопоставлять продольный импульс p_z и полную энергию электронов. Темная полоса на нижней границе фазового портрета на рис. 5 обозначает поток электронов с одинаковыми импульсами. Эти электроны эмиттируются с торцевой поверхности коллектора на координате $L = 5$ см, ускоряются в промежутке до границы плазмы на расстоянии $0.5 \dots 1$ см, проходят всю систему справа налево и оседают на левой границе. Импульс электронов при их осаждении равен приблизительно $0.35 \cdot mc$, что соответствует энергии 30 кэВ и потенциалу коллектора 30 кВ в этот момент. Обратим внимание, что в середине пути электронов их энергия чуть больше: нормированный импульс достигает 0.5.

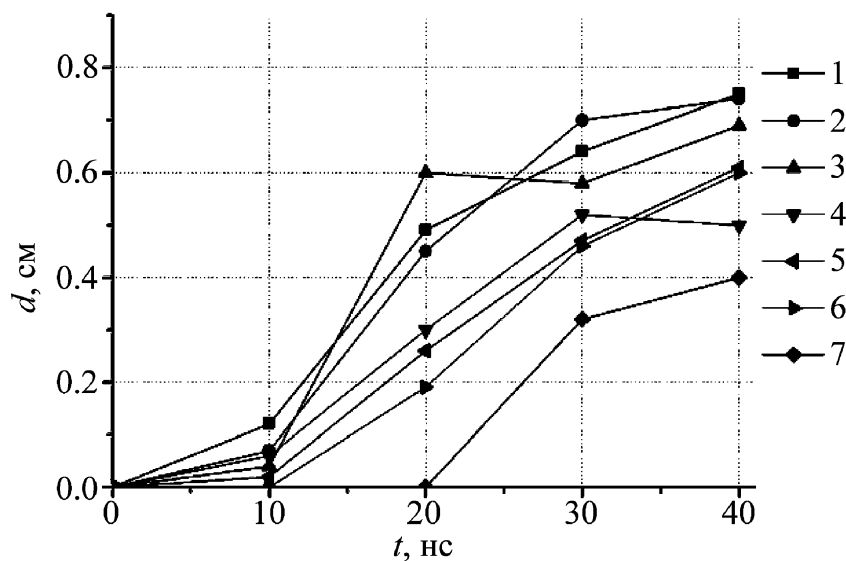


Рис. 4: Зависимость величины зазора между плазмой и коллектором от времени в присутствии СВЧ при разном потенциале коллектора: 1 – $U = -50$ кВ; 2 – $U = -25$ кВ; 3 – $U = -15$ кВ; 4 – $U = -5$ кВ; 5 – $U = 5$ кВ; 6 – $U = 15$ кВ; 7 – $U = 50$ кВ.

Через 35 нс после фронта тока (см. рис. 5(б)) потенциал коллектора несколько уменьшается, и на левой границе электроны оседают с продольным импульсом 0.3 -нс, что соответствует энергии 23 кэВ. В то же время в центральной части импульс электронов превышает 0.6 -нс (энергия 85 кэВ), и такое увеличение энергии электронов пучка имеет только одно объяснение, а именно, увеличение потенциала плазмы. Именно положительный потенциал плазмы создает на левой границе ситуацию, аналогичную рассмотренной выше, а именно, уход ионов и образование зазора между плазмой и левой границей системы. Одновременно на правой границе плазмы с коллектором усиливается электростатическое поле, способствующее расширению зазора между ними. Напомним, что ток электронного потока с коллектора достигает 1 кА, так что его мощность при движении в плазме имеет порядок 10^8 Вт.

Плазма, существующая с начала процесса, подвергается воздействию со стороны обоих электронных потоков: через левую границу инжектируется РЭП (500 кэВ, 2 кА), а с коллектора эмиттируется поток электронов, подробно описанный выше. Электростатический заряд РЭП выталкивает электроны плазмы, как описано в [7], вследствие чего их концентрация снижается на 10 – 15% . Кроме того, электроны плазмы частично вытесняются и замещаются электронами, эмиттированными с коллектора. В результате,

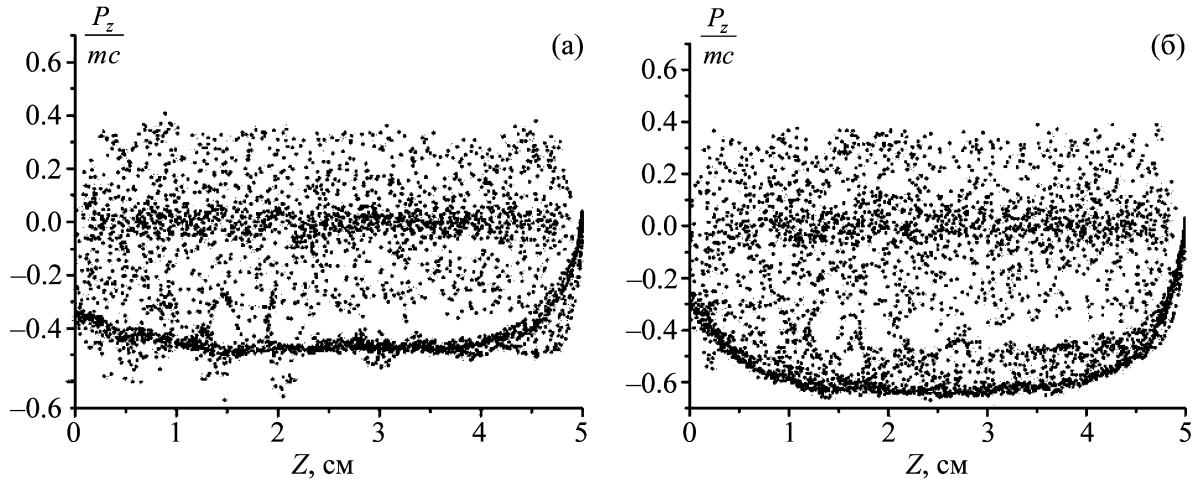


Рис. 5: Фазовые портреты эмиттированных с коллектора электронов в различные моменты времени: (а) 25 нс; (б) 35 нс.

через 30 нс более трети электронов, изначально присутствовавших в плазме, оказываются на левой границе и исчезает.

Поток электронов с коллектора с энергией частиц 50...100 кэВ и током до 1 кА распространяется в непосредственной близости от трубчатой плазмы с концентрацией $\sim 10^{13}$ см $^{-3}$ и, частично, внутри нее. Характер волны, возникающей при таком плазменно-пучковом взаимодействии, можно оценить, как показано в [10]. Для указанных параметров плазмы и электронного потока расчеты предсказывают колебания на частоте ~ 17 ГГц (ленгмюровская частота плазмы равна 35 ГГц) с длиной волны 0.7 см, а погонный коэффициент усиления равен 1.3 см $^{-1}$. На рис. 6(а) показан фазовый портрет электронов плазмы через 10 нс после начала процесса, где хорошо видна модуляция с длиной волны ≈ 5 мм. Через 40 нс электроны плазмы термализуются (см. рис. 6(б)), и модуляция становится едва заметной. Видно, что величины частот и длин волн существенно отличаются от параметров взаимодействия плазмы и РЭП, при которых частота ниже (~ 10 ГГц), а погонный коэффициент усиления ниже на порядок: 0.2 см $^{-1}$.

При достаточной длине плазменно-пучкового взаимодействия $L = 15$ см возникает генерация СВЧ-волны с мощностью ~ 100 МВт на частоте 10 ГГц (см. рис. 7). Через 30 нс после начала процесса СВЧ-генерация срывается и не возобновляется, по крайней мере, в течение нескольких десятков наносекунд. Динамика изменения параметров системы мало отличается от той, которая соответствует $L = 5$ см и была проил-

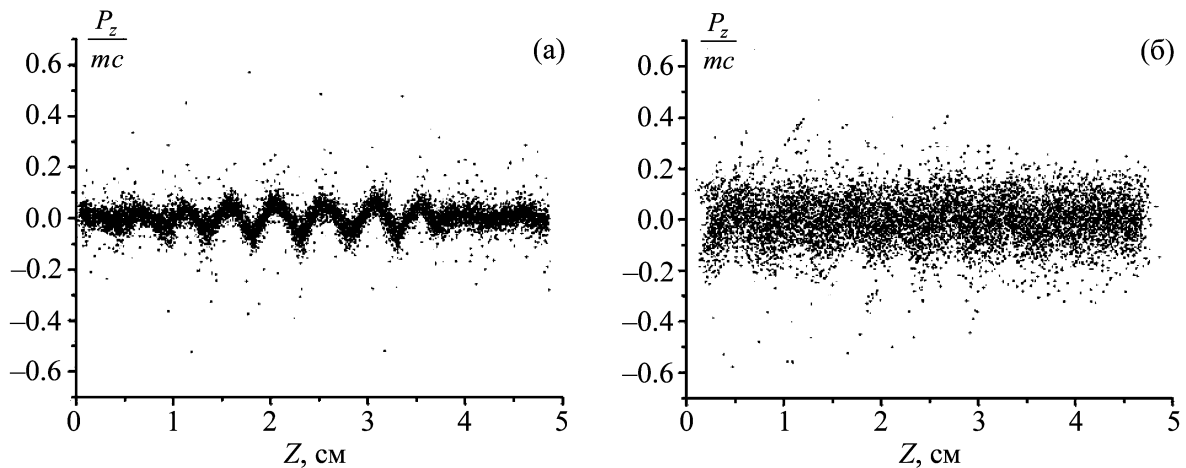


Рис. 6: Фазовые портреты электронов плазмы в различные моменты времени: (а) 10 нс; (б) 40 нс.

люстрирована выше. Разница заключается в том, что при наличии СВЧ на фазовых портретах электронов видна модуляция на частоте 10 ГГц. Отметим специально: в выходном излучении нет компоненты с частотой ~ 17 ГГц, определяемой взаимодействием плазмы и потока электронов с коллектора. Колебания, возбуждаемые электронами со сравнительно низкой скоростью, из плазмы не выходят.

В процессе взаимодействия энергия электронов плазмы, равная первоначально 5 эВ, существенно увеличивается. На рис. 8 показано суммарное распределение по импульсам электронов плазмы и электронов, эмиттированных с коллектора, т.е. всех электронов, принимающих участие во взаимодействии с РЭП. Распределение соответствует моменту времени 30 нс после начала, когда СВЧ-излучение прерывается. Основная часть электронов имеет импульсы до $0.2 \cdot mc$ (энергии до 10 кэВ, максимум распределения по энергиям приходится на 2.5 кэВ), а пик при $p_z = 0.6 \cdot mc$ (85 кэВ) соответствует потоку электронов с коллектора (см. рис. 5(а)).

Вопросу о влиянии температуры плазмы на срыв генерации СВЧ была посвящена отдельная серия расчетов. Температура электронов T_e и ионов T_i плазмы в системе с длиной $L = 15$ см задавались изначально высокими с целью определения порога, при котором генерация СВЧ не начиналась. Оказалось, что существенное падение мощности СВЧ-волны наблюдается при $T_e > 15$ кэВ, что заметно превышает указанную выше энергию, при которой имеет место срыв СВЧ-излучения.

Обсуждение результатов. Обнаруженный в расчетах [7] процесс образования зазора между плазмой и коллектором является непосредственной причиной срыва работы

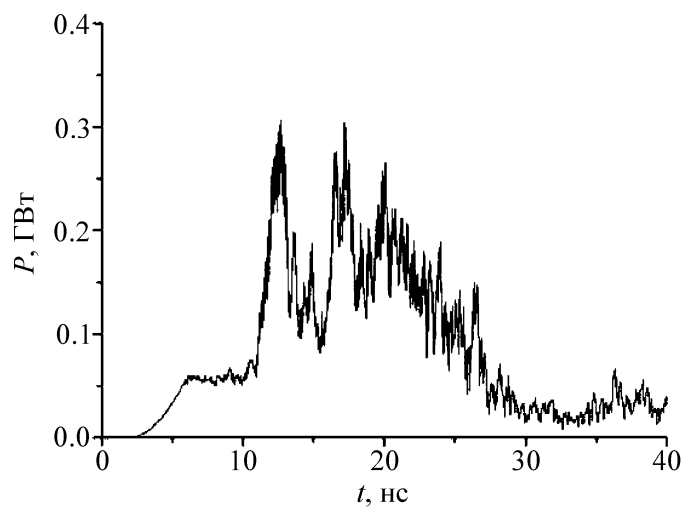


Рис. 7: Зависимость выходной мощности генератора от времени. Параметры в тексте.

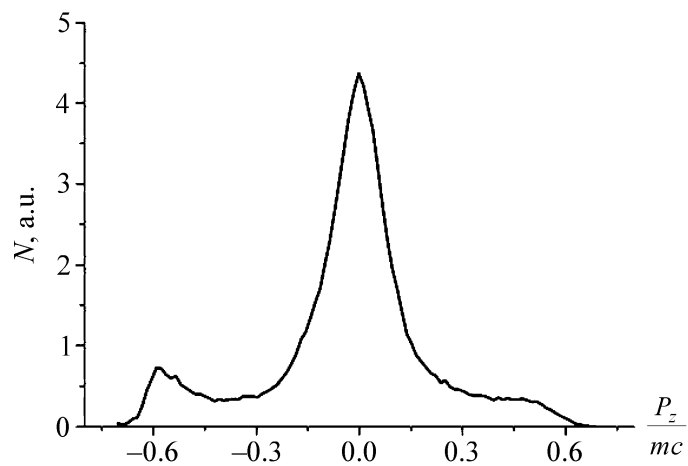


Рис. 8: Суммарное распределение по импульсам электронов плазмы и эмиттированных с коллектора в момент срыва СВЧ.

СВЧ-генератора. Приведенное моделирование помогает понять полученные в многочисленных экспериментах ([6] и др.) результаты, а именно, роль коаксиального коллектора как причины укорочения СВЧ-импульсов плазменных релятивистских СВЧ-генераторов. Например, можно найти численное соответствие описанной модели срыва процесса СВЧ-генерации с упоминавшимися в *Введении* результатами экспериментов с СВЧ-усилителем [8], где длины волн были приблизительно в 4 раза больше (частоты 2.4 и 2.7 ГГц), чем в настоящей работе. В эксперименте [8] только через 150 нс после начала импульса заканчивалась генерация шума, и начинался режим усиления входного сигнала, как мы предполагаем, когда коэффициент отражения падал до порога возбуждения автоколебаний. Если предположить, что скорость движения границы плазмы такая же, что и в настоящем исследовании, то для прекращения генерации необходимо приблизительно в 4 раза больше времени, чем в настоящей работе, что и видно на рис. 7.

Существуют, однако, и другие эксперименты, которые демонстрировали способность ПРГ работать без срыва излучения. Например, в работе [11] описан плазменный генератор СВЧ-импульсов с мощностью до 40 МВт и длительностью 800 нс, а длительность импульса частотно-периодического ПРГ [12] совпадает с длительностью тока ~ 70 нс. Принципиальным отличием указанных приборов от описанной выше системы является конструкция коллектора, а именно, в [11, 12] применялся не торцевой, а полый коллектор, похожий по форме на острокрюмочный взрывоэмиссионный катод.

Численное моделирование ПРГ с полым коллектором, проведенное аналогично описанным выше расчетам, не выявило существенных отличий процессов в такой системе от того, что происходит в ПРГ с торцевым коллектором. Так же ионы притягивались к коллектору и исчезали на его поверхности (в том числе, и двигаясь по радиусу внутри коллектора), так же рождался поток электронов с кромки коллектора по направлению к левой границе, и примерно с той же скоростью рос зазор между коллектором и плазмой. Таким образом, в численной модели по-прежнему проявлялся эффект укорочения СВЧ-импульса, что полностью противоречило данным эксперимента.

Такое несоответствие можно объяснить, если принять во внимание, что в модель были заложены не все явления, имеющие место в эксперименте. Очевидным фактом является то, что на поверхности коллектора имеет место взрывная эмиссия электронов, поскольку только она позволяет эмиттировать электронный ток с плотностью 1 кА/см^2 . В компьютерной модели взрывная эмиссия была представлена только неограниченно большой способностью эмиссии электронов, тогда как в действительности имеет место

еще и образование плазмы на поверхности. Хорошо известно, что такая плазма рождается в виде отдельных факелов, задержка появления которых относительно фронта импульса напряжения сильно зависит от напряженности электрического поля [13]. Это, а также эффект экранировки [14] приводят к тому, что на острой кромке полого катода плазма появляется быстрее, и катодные факелы расположены более плотно и равномерно, чем на поверхности торцевого катода (в данном случае роль катода играет коллектор РЭП). Давно известна также и скорость распространения плазмы взрывоэмиссионного катода вдоль магнитного поля [15], в описанных выше условиях (электрическое поле на торце коллектора $E_z \sim 10^5 \dots 10^6$ В/см) скорость плазмы имеет порядок $10^7 \dots 10^8$ см/с. Концентрация плазмы на расстояниях до 2 мм от эмиттера не превышает 10^{14} см $^{-3}$ [16] и далее снижается. Приведенные параметры плазмы взрывоэмиссионного катода получены давно и серьезной ревизии с тех пор не подвергались.

Адекватное компьютерное моделирование самосогласованного процесса образования и движения плазмы взрывоэмиссионного катода (не отдельных факелов) является очень трудной задачей, которую, как нам известно, пока решить не удалось. Следующий далее вывод можно поэтому воспринимать лишь как гипотезу, хотя и подкрепленную приведенными выше соображениями. Мы полагаем, что в ПРГ с полым коллектором [11, 12] имела место компенсация движения границы плазмы от коллектора за счет образования плазмы взрывной эмиссии и ее движения в том же направлении. Вследствие этого не происходило образования значительного зазора между двумя коаксиальными волноводами как причины [7] укорочения СВЧ-импульса.

Вопрос о влиянии роста температуры плазмы на укорочение СВЧ-импульса в ПРГ был вызван в значительной мере желанием перепроверить результаты [17]. В этой работе проводился расчет ПРГ с примерно теми же параметрами, что и в настоящей модели, плазма представлялась крупными частицами, но при этом ионы считались неподвижными. Понятно, что движения границ у такой плазмы не было. Укорочение СВЧ-импульса в ПРГ [17] происходило, когда энергия значительной части электронов превышала 100 кэВ, что имело место через ≈ 100 нс после начала импульса. В настоящей модели срыв СВЧ-излучения происходил значительно раньше, при этом температура электронов плазмы была далека даже от пороговой величины 15 кэВ, способ определения которой обсуждался выше. Кроме того, температура электронов плазмы – по результатам наших расчетов – практически не зависит от формы коллектора, тогда как эксперименты [11] и [12] показали кратное отличие длительности СВЧ-импульсов в ПРГ с коллекторами разной формы. Приведенные соображения позволяют заключить,

что рост температуры плазмы не является главной причиной срыва процесса СВЧ-излучения ПРГ, по крайней мере, в условиях описанного численного эксперимента.

Заключение. Проведенное компьютерное моделирование плазменного релятивистского СВЧ-генератора позволило понять механизм образования зазора между плазмой и коллектором, который приводит к укорочению СВЧ-импульсов. Этот зазор может образовываться при наличии разности потенциалов между плазмой и коллектором вследствие прохождения тока РЭП, но может появиться под действием только СВЧ-полей. Рост зазора происходит вследствие постепенного ухода ионов плазмы на коллектор с последующим исчезновением (нейтрализацией) на его поверхности. Встречный поток электронов с поверхности коллектора способствует нагреву плазмы и увеличению ее потенциала, что еще больше стимулирует поток ионов на коллектор.

Нагрев плазмы как фактор ослабления черенковского взаимодействия с РЭП не является главной причиной укорочения СВЧ-импульса ПРГ в описанных условиях. Для срыва СВЧ-генерации при неизменной геометрии плазмы ее температура должна быть заметно выше.

В реальных экспериментах на коллекторе появляется плазма как результат взрывной эмиссии электронов. Есть основания предполагать, что эта плазма компенсирует движение границы заранее созданной плазмы ПРГ, предотвращая тем самым укорочение СВЧ-импульсов.

Авторы признательны В. П. Тараканову за помощь в проведении расчетов с помощью кода “Карат”, а также А. А. Рухадзе и С. А. Баренгольцу за полезные обсуждения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц, генерации электромагнитного излучения в импульсных системах большой мощности” при поддержке РФФИ, гранты № 10-08-00994-а и 12-08-00638-а.

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] N. F. Kovalev, V. E. Nechaev, M. I. Petelin, and N. I. Zaitsev, IEEE Trans. Plasma Sci. **26**(3), 246 (1998).
- [4] О. Т. Лоза, Радиотехника и электроника **54**(7), 840 (2009).

- [5] М. В. Кузелев, О. Т. Лоза, А. А. Рухадзе и др., *Физика плазмы* **27**(8), 710 (2001).
- [6] И. Л. Богданкевич, Д. М. Гришин, А. В. Гунин и др., *Физика плазмы* **34**(10), 926 (2008).
- [7] И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **37**(2), 16 (2010).
- [8] П. С. Стрелков, И. Е. Иванов, Д. В. Шумейко, *Физика плазмы* **38**(6), 536 (2012).
- [9] V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (Springfield VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992).
- [10] А. Ф. Александров, Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе, *Основы электродинамики плазмы* (М., Высш. шк., 1988).
- [11] O. T. Loza, P. S. Strelkov, and I. E. Ivanov, in: *IEEE Trans. on plasma science, Special Issue on high power microwave generation*, June 1998, Vol 26, N 3, p. 336.
- [12] О. Т. Лоза, Д. К. Ульянов, П. С. Стрелков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **38**(4), 47 (2011).
- [13] С. П. Бугаев, Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский, *УФН* **115**(1), 101 (1975).
- [14] С. Я. Беломытцев, С. Д. Коровин, Г. А. Месяц, *Письма в ЖТФ* **6**(18), 1089 (1980).
- [15] А. Н. Бастриков, С. П. Бугаев, В. И. Кошелев и др., *Физика плазмы* **10**(6), 1298 (1984).
- [16] В. С. Бурмасов, С. Г. Воропаев, А. Л. Добривский и др., *Физика плазмы* **12**(4), 435 (1986).
- [17] I. L. Bogdankevich, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and V. P. Tarakanov, *Problems of Atomic Science and Technology. N.1. Series: Plasma Physics* (9), 102 (2003).

Поступила в редакцию 19 сентября 2012 г.