

УДК 533.932

УСТРАНЕНИЕ СРЫВА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

С. Е. Ернылева, О. Т. Лоза

С помощью компьютерного моделирования определен механизм развития эффекта укорочения СВЧ-импульса в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе с мощностью 10^8 Вт. Предложены методы устранения причин срыва СВЧ-генерации, показана возможность значительного увеличения длительности процесса излучения.

Ключевые слова: СВЧ-генератор, плазма, релятивистский сильноточный электронный пучок, укорочение СВЧ-импульса.

Настоящая работа продолжает цикл исследований эффекта укорочения импульса излучения в плазменном релятивистском генераторе СВЧ-импульсов, которые проводились путем численного моделирования с помощью полностью электромагнитного кода КАРАТ [1]. Схема расчетной модели плазменного релятивистского СВЧ-генератора показана на рис. 1.

Результаты исследований [2–4] и последующие расчеты показали сценарий срыва процесса СВЧ-генерации.

Фронт тока релятивистского электронного пучка (РЭП) индуцирует обратный ток электронов плазмы, который обеспечивается эмиссией электронов с коллектора. При концентрации плазмы $\sim 10^{13}$ см $^{-3}$ и начальной температуре 5 эВ дебаевский радиус равен $\sim 10^{-4}$ см. Фронт тока снижает потенциал коллектора до $-10^4 \dots -10^5$ В и увеличивает электрическое поле на поверхности до $\sim 10^8$ В/см, обеспечивая взрывную эмиссию электронов с высокой плотностью тока. Начинается рост промежутка Δ между коллектором и плазмой (см. рис. 1, механизм явления описан в [4]). На левой границе плазмы появляется похожий, но меньший по длине промежуток.

Электроны РЭП с энергией 500 кэВ взаимодействуют с плазмой на частоте $f_{\text{НРМ}} \approx 10$ ГГц, передавая энергию медленной плазменной волне. При этом электроны плазмы

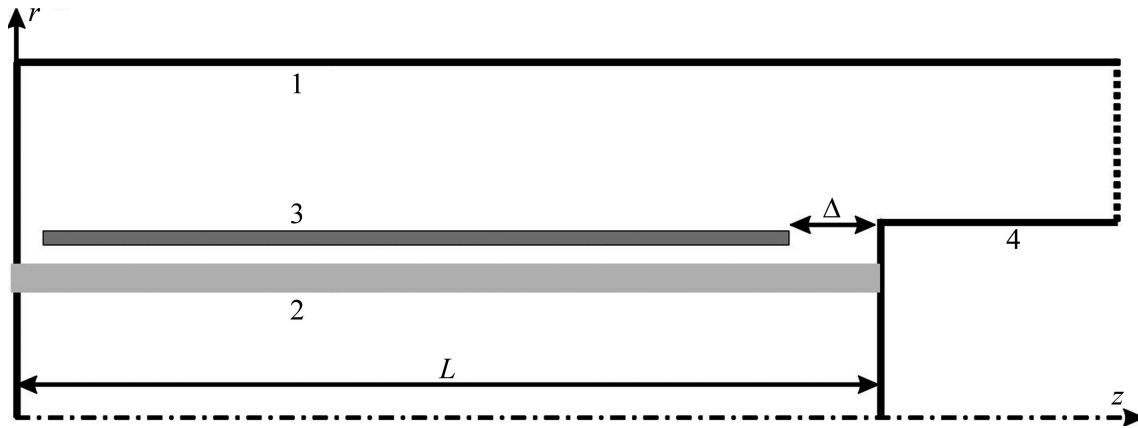


Рис. 1: Схема плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 – камера; 2 – релятивистский электронный пучок; 3 – плазма; 4 – коллектор.

колеблются с амплитудой

$$\delta = \frac{eE_z}{m\omega^2}, \quad (1)$$

где e и m – заряд и масса электрона, E_z – амплитуда компоненты электрического поля СВЧ-волны вдоль направления магнитного поля, ω – круговая частота поля волны. Для СВЧ-поля вблизи коллектора $E_z \approx 0.4$ МВ/см амплитуда $\delta \approx 2$ мм.

Электроны плазмы, находящиеся на расстоянии от коллектора, меньшем δ , достигают его поверхности. Потенциал плазмы увеличивается, что поддерживает ток электронов с коллектора на уровне ~ 1 кА [4]. Когда амплитуда колебаний электронов δ становится меньше образовавшегося зазора Δ между коллектором и плазмой, падает интенсивность выноса электронов из плазмы на правую границу и снижается скорость роста ее потенциала.

Нулевой потенциал левой границы существенно превышает потенциал отрицательного коллектора, поэтому поток электронов идет насквозь через плазму от правой до левой границы. Ток электронов с коллектора взаимодействует с плазмой, передавая энергию медленной плазменной волне. Электроны, обладающие энергией $< 10^5$ эВ, взаимодействуют с плазмой на частоте, почти равной ленгмюровской частоте плазмы ~ 30 ГГц, существенно превышающей частоту $f_{\text{НРМ}}$ взаимодействия с РЭП. Групповая скорость медленной плазменной волны при таком взаимодействии $\ll c$, и энергия не излучается из плазмы, а нагревает ее до $\sim 10^4 \dots 10^5$ эВ [4].

Наиболее горячая фракция электронов плазмы может уходить на границы, повышая потенциал плазмы и поддерживая поток электронов с коллектора в плазму. Таким образом, осуществляется своеобразный обмен: электроны с энергией, соответствующей

потенциалу плазмы, приходят в нее и термализуются, а электроны с большей энергией плазму покидают.

Рост промежутка Δ между плазмой и коллектором снижает коэффициент отражения плазменной волны от коллектора [3], ослабляя обратную связь в генераторе. Падение коэффициента отражения ниже порога автогенерации прекращает заметные колебания плазмы на частоте $f_{\text{НРМ}}$ взаимодействия с РЭП. В этот момент зазор $\Delta = 1.1$ см, что снижает коэффициент отражения не более чем в 3 раза [3]. Температура частиц плазмы увеличивается от начальных 5 эВ до $T_i = 700$ эВ для ионов и до $T_e = 20 \cdot 10^3$ эВ для электронов.

Оценки показывают, что снижение коэффициента отражения само по себе является серьезным, но не всегда достаточным фактором для полного срыва автоколебаний. При пространственном коэффициенте усиления волны (инкременте) $\delta k \approx 0.22 \text{ см}^{-1}$, рассчитанном по линейной теории, падение коэффициента отражения в 3 раза может быть скомпенсировано увеличением длины плазменно-пучкового взаимодействия на ~ 5 см. Рассчитанная начальная пороговая длина автогенерации $L_{\text{th}} = 6$ см при полной длине $L = 16.5$ см (см. рис. 1) заставляет усомниться, что только снижение коэффициента отражения приводит к прекращению СВЧ-колебаний.

Пороговая длина автогенерации L_{th} находилась в расчетах при постепенном увеличении длины L до значения, при котором в течение импульса начинался рост амплитуды автоколебаний. Тот же метод позволил оценить влияние температуры плазмы на инкремент. Оказалось, что при изменении температуры электронов от 5 эВ до 20 кэВ (и соответствующем росте температуры ионов до 700 эВ) и отсутствии потока с коллектора через плазму пороговая длина, а вместе с ней и коэффициент усиления, практически не меняются.

Причиной существенного снижения инкремента оказался поток электронов с коллектора в плазму, порождающий колебания плазмы на частоте, отличной от $f_{\text{НРМ}}$. На рис. 2 показано, что с ростом тока от 0 до 1 кА пороговая длина автоколебаний увеличивается более чем вдвое, и во столько же раз падает погонный коэффициент усиления (инкремент) плазменной волны электронами релятивистского пучка. Одновременное снижение коэффициентов отражения и усиления также можно скомпенсировать увеличением длины системы, но это увеличение должно быть очень значительным.

Сквозной поток электронов с коллектора через плазму как причину падения инкремента можно устранить, если выровнять потенциалы на границах плазмы. На рис. 3 представлена модифицированная схема плазменного релятивистского СВЧ-генератора,

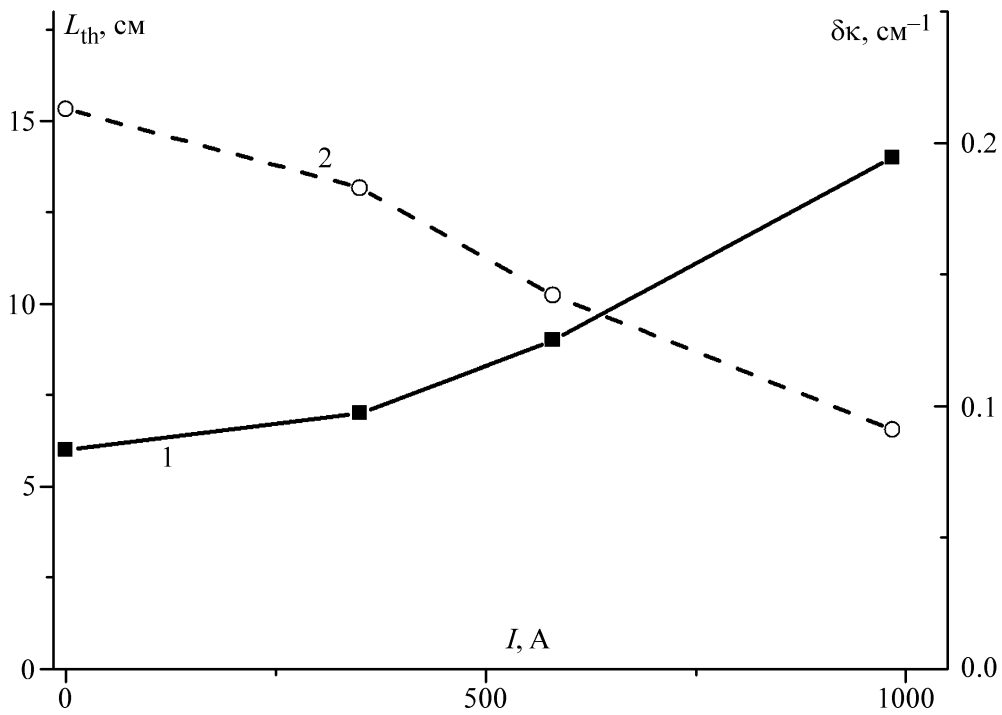


Рис. 2: Зависимость пороговой длины L_{th} – 1 и коэффициента усиления δ_k – 2 от тока I электронов с коллектора через плазму.

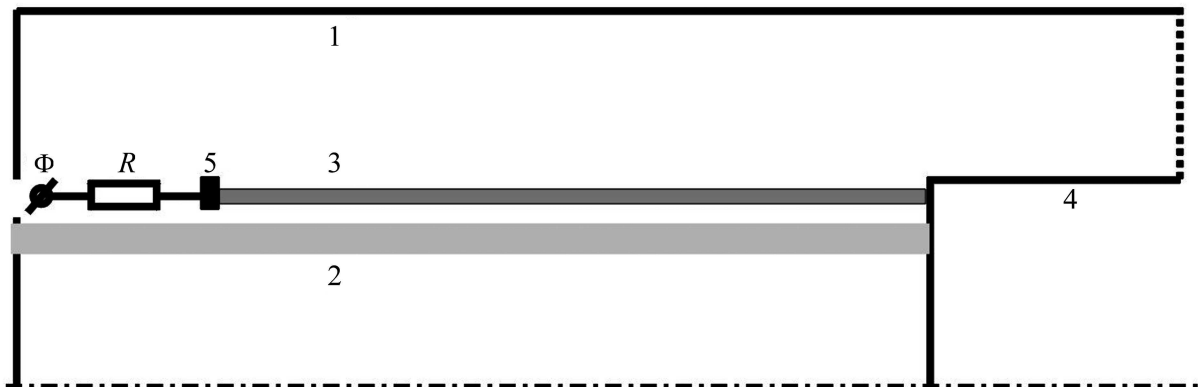


Рис. 3: Схема модифицированного плазменного релятивистского СВЧ-генератора. 5 – электрод с отрицательным потенциалом. Остальное – как на рис.1.

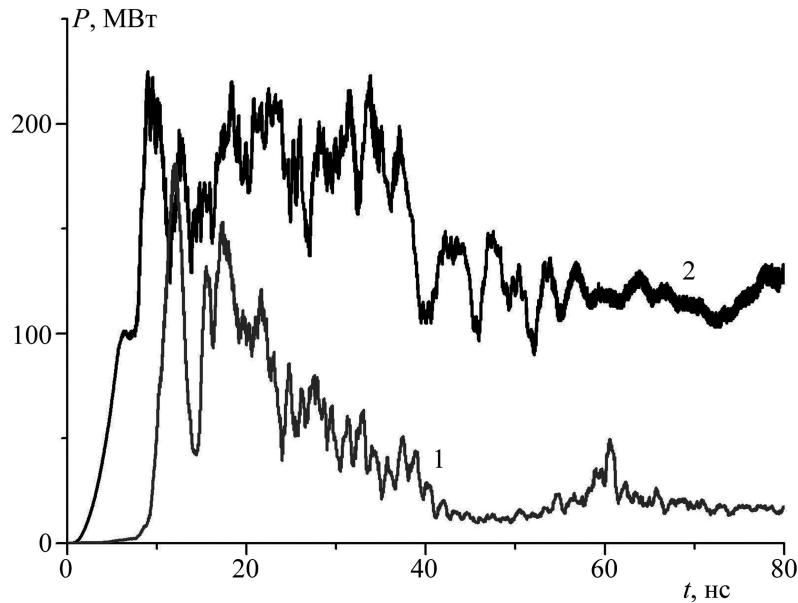


Рис. 4: Зависимости мощности излучения P от времени t СВЧ-генераторов, показанных на рис. 1 (1) и на рис. 3 (2).

отличающаяся от показанной на рис. 1 традиционной конструкции наличием дополнительного элемента. С левой стороны плазма 3 граничит не со стенкой камеры 1, имеющей нулевой потенциал, а с электродом 5, подсоединенным через элемент R к источнику отрицательного напряжения Φ . Если потенциалы коллектора 4 и электрода 5 синхронно снижаются, разность потенциалов на границах плазмы равна нулю, и сквозной ток через нее не возникает. В качестве источника отрицательного потенциала в эксперименте может быть использован катододержатель ускорителя, тогда $\Phi = -500$ кВ. Величина активного (или реактивного) сопротивления R определяется малостью тока через плазму, напр., при $R = 10$ кОм ток не превысит 50 А, что значительно меньше тока ~ 1 кА, протекавшего через плазму в первоначальной конструкции СВЧ-генератора. Возможны и другие реализации предложенного метода выравнивания потенциалов на границах плазмы, но в рамках настоящей работы они рассматриваться не будут.

На рис. 4 показаны импульсы излучения двух СВЧ-генераторов со всеми одинаковыми параметрами, кроме дополнительного электрода, ограничивающего ток через плазму. При наличии этого электрода увеличивается коэффициент усиления волны, на что указывает меньшая задержка начала импульса. Мощность СВЧ-волны в начале импульса достигает 200 МВт, после чего стабилизируется на уровне 120 МВт, но не падает до нуля, как при отсутствии электрода.

Таким образом, чтобы подавить срыв СВЧ-излучения, необходимо выровнять потенциалы на границах плазмы для устранения сквозного тока через нее. Очевидно, однако, и другое: способ не устраняет полностью причин укорочения СВЧ-импульса, он лишь сильно замедляет их развитие. Токи с границ в плазму и обратно не исчезают полностью. Потеря наиболее горячих электронов, уходящих из плазмы, возмещается потоком почти моноэнергетичных электронов с обеих границ в положительно заряженную плазму, но эти токи вместе меньше сквозного тока с коллектора в первоначальной конфигурации. Даже при отсутствии сквозного тока температура плазмы возрастает и, как следствие, возрастает ее потенциал, усиливается электростатическое поле на коллекторе, электронный поток с коллектора и далее разогревает плазму. Тем не менее, для большинства экспериментальных установок с длительностью импульса до 100 нс предложенный метод увеличения длительности СВЧ-импульса может быть весьма полезным.

Авторы признательны В. П. Тарakanову за помощь в проведении расчетов с использованием кода “Карат”, а также И. Л. Богданкевич 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, грант 12-08-00638-а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (Berkley Research Associates, Springfield, 1992).
- [2] I. L. Bogdankevich, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, *Problems of Atomic Science and Technology*. N. 1. Series: Plasma Physics, 102 (2003).
- [3] И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **37**(2), 16 (2010).
- [4] С. Е. Ернылева, И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(7), 10 (2013).

Поступила в редакцию 28 января 2014 г.