

## УВЕЛИЧЕНИЕ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

О. Т. Лоза, Д. К. Ульянов, П. С. Стрелков,  
И. Е. Иванов, Р. В. Баранов

*Экспериментально исследована работа импульсно-периодического плазменного релятивистского СВЧ-генератора с импульсной мощностью 50 МВт. Изменение формы коллектора электронов и выходного узла помогло существенно повысить среднюю мощность излучения. Длительность СВЧ-импульса увеличилась от 30 до 70 нс, а частоту повторения СВЧ-импульсов удалось повысить от 5 до 50 Гц.*

**Ключевые слова:** релятивистская электроника, СВЧ-генератор, плазма, укорочение СВЧ-импульса.

Первый импульсно-периодический плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ) был описан в работе [1]. Принцип действия ПРГ основан на черенковском взаимодействии сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с предварительно созданной плазмой [2]. Источником энергии для СВЧ-генератора служил ускоритель электронов СИНУС [3], формирующий в диоде импульсы напряжения с амплитудой 500 кВ и длительностью 70 нс по полувысоте. Максимальная для этого ускорителя частота формирования импульсов равнялась 50 Гц, длительность пачки импульсов – одна секунда. Были продемонстрированы генерация СВЧ-излучения с импульсной мощностью 50 МВт и возможность перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в полосе частот от 5 до 20 ГГц.

Особенности ПРГ, описанного в работе [1], не позволяли эффективно использовать возможности ускорителя. Длительность СВЧ-импульсов 30...40 нс была вдвое меньше длительности импульсов тока РЭП, а максимальное число СВЧ-импульсов в пачке не превышало 6. Таким образом, суммарная продолжительность СВЧ-излучения была

---

Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: loza@fpl.gpi.ru.

на порядок меньше той, которую мог обеспечить ускоритель. Целью настоящей работы было устранить это несоответствие, и тем самым существенно повысить среднюю мощность СВЧ-излучения.

Причины укорочения СВЧ-импульса в ПРГ обсуждались в работе [4]. Моделирование ПРГ с геометрией, аналогичной [1], которое проводилось с помощью электродинамического кода Карат [5], позволило объяснить сокращение длительности СВЧ-импульса до 30 нс. Оказалось, что электростатическое поле РЭП вызывает уход плазмы из области, непосредственно граничащей с коллектором электронов.

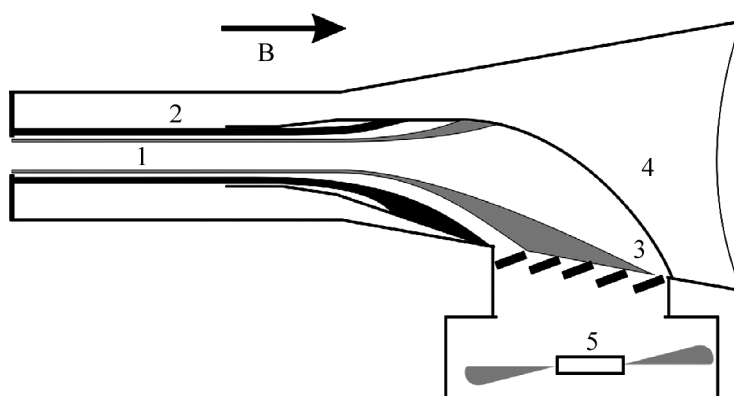


Рис. 1: Схема плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 – релятивистский электронный пучок; 2 – плазма; 3 – коллектор; 4 – рупор; 5 – турбомолекулярный насос.

Причиной того, что ПРГ [1] не мог генерировать СВЧ-излучение в каждом из 50 импульсов пачки с длительностью 1 с, также были процессы на коллекторе. Электроны, оседавшие на его поверхности во время прохождения тока ускорителя, вызывали десорбцию газа. В течение интервала времени 20 мс между импульсами этот газ не успевал откачиваться, давление постепенно возрастало, нарушались условия создания плазмы с необходимыми параметрами в области ее взаимодействия с РЭП, и СВЧ-генерация становилась невозможной.

Для решения описанных проблем конструкция ПРГ претерпела изменения, показанные на рис. 1. Как и в СВЧ-генераторе [1], РЭП 1 и плазма 2 взаимодействуют в сильном магнитном поле  $\mathbf{B}$  в области, ограниченной плоскостью инжекции слева и краем коллектора 3 справа. СВЧ-излучение распространяется далее по металлическому волноводу в выходной рупор 4. Как и в [1], конструкция не является аксиально-симметричной: коллекторный узел является одновременно преобразователем ТЕМ-волны коаксиального

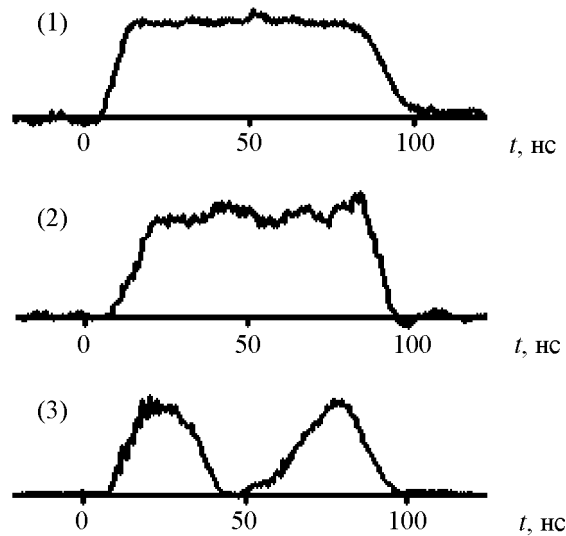


Рис. 2: Осциллограммы импульсов: 1 – напряжение на катоде; 2, 3 – СВЧ-излучение в разных режимах.

волновода в волну типа Н<sub>11</sub> в рупоре круглого сечения.

В отличие от ПРГ [1], где графитовый коллектор был выполнен в виде сплошного цилиндра, ограничивавшего распространение РЭП, здесь коллектор представляет собой полую конструкцию, форма которой частично повторяет форму магнитных силовых линий. Электроны пучка проникают в канал с диаметром 2.3 см и длиной 15 см и распространяются в нем, следуя магнитному полю, до более широкой камеры, где оседают на стенки. Газ из камеры откачивается турбомолекулярным насосом (5 на рис. 1) через отверстие с диаметром 10 см. Таким образом, десорбированный с поверхности коллектора газ лишь в незначительной степени уходит в область плазменно-пучкового взаимодействия, а основная его часть удаляется.

Следует напомнить, что полый коаксиальный коллектор применялся в плазменных СВЧ-генераторах и ранее. Именно такая форма коллектора позволила создателям ПРГ [6] получать одиночные импульсы СВЧ-излучения с максимальной мощностью 40 МВт и длительностью до 800 нс. Целью применения полого коллектора в работе [6] было устранение коллекторной плазмы из области плазменно-пучкового взаимодействия.

Использование полого коллектора с дополнительной вакуумной откачкой, показанного на рис. 1, помогло увеличить число СВЧ-импульсов в пачке до 50, т.е. до величины, определяемой возможностями ускорителя. Осциллограммы процессов в ПРГ показаны на рис. 2. Напряжение на катоде ускорителя и ток РЭП продолжают приблизительно

70 нс, в течение всего этого времени может происходить СВЧ-излучение. Возможная форма СВЧ-импульсов – почти прямоугольная или состоящая из нескольких пиков – определяется особенностями работы ПРГ, а именно, шириной спектра и динамикой изменения частоты излучения в течение импульса. Обсуждение этих особенностей выходит за рамки настоящей работы, поскольку они являются темой отдельных исследований.

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 гранта РФФИ N 10–08–00994-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. Л. Богданкевич, Д. М. Гришин, А. В. Гунин и др., *Физика плазмы* **34**(10), 926 (2008).
- [2] М. В. Кузелев, О. Т. Лоза, А. А. Рухадзе и др., *Физика плазмы* **27**(8), 710 (2001).
- [3] G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. V. Gunin, et al., *Laser and Particle Beams* **21**, 197 (2003).
- [4] И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **37**(2), 16 (2010).
- [5] V. P. Tarakanov, *User’s Manual for Code KARAT* (Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992).
- [6] O. T. Loza., P. S. Strelkov, and I. A. Ivanov, *IEEE Trans. on Plasma Science* **26**(3), 336 (1998).

Поступила в редакцию 17 июня 2010 г.