

УДК 533.932

О СОЗДАНИИ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА БЕЗ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И. Л. Богданкевич¹, В. О. Литвин², О. Т. Лоза^{2,3}

В численной модели предложен способ генерации СВЧ-импульсов с мощностью ~ 1 ГВт и частотой, управляемой в полосе от 2 до 15 ГГц, при взаимодействии релятивистских электронов с плазмой без сильного внешнего магнитного поля. Комбинация широкополосного плазменного релятивистского СВЧ-генератора и монохроматического СВЧ-генератора на линии с магнитной самоизоляцией (MILO) позволяет создать прибор, сочетающий достоинства обоих прототипов.

Ключевые слова: СВЧ-генератор на линии с магнитной самоизоляцией, плазменный MILO.

Существует несколько тенденций в развитии релятивистской сильноточной СВЧ-электроники, среди которых выделяются стремление к повышению эффективности приборов “от розетки” и поиск возможностей расширения спектрального диапазона. Эффективность мощного СВЧ-генератора в значительной степени определяется необходимостью применения сильного магнитного поля для формирования электронного потока, система создания которого с помощью мощных соленоидов может потреблять свыше 90% общих затрат энергии. Именно поэтому популярность приобрели СВЧ-генераторы без внешнего магнитного поля, такие как виркатор и СВЧ-генератор на линии с магнитной самоизоляцией (magnetically insulated transmission line oscillator, MILO [1]), так и не приобретший устойчивой аббревиатуры в русском языке. Эффективность экспериментальных мощных виркаторов достигает заметных величин $\sim 5\%$ только за счет применения резонансного рефлектора, сужающего спектр СВЧ-генерации до $\sim 1\%$ [2]. MILO представляет собой аналог лампы обратной волны М-типа с эффективностью $\sim 10\%$ и металлической замедляющей структурой, определяющей постоянную частоту генерации и узкий спектр.

¹ ИОФРАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: biga@fpl.gpi.ru.

² РУДН, 117198 Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

³ НИЦ “Курчатовский Институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Высокоэффективная генерация широкополосного излучения суб- и гигаваттной мощности традиционно осуществляется в виде коротких биполярных видеоимпульсов [3], но этот способ эффективен лишь для частот $\sim 1 \dots 3$ ГГц и ниже. Диапазон $2 \dots 30$ ГГц перекрывает перестраиваемый по частоте плазменный релятивистский СВЧ-генератор с мощностью 50 МВт, обладающий к тому же и изменяемой шириной спектра от 1% до 100% [4]. Однако “электронный” КПД этого прибора $\sim 5\%$ падает на порядок и более при учете расходов энергии на создание магнитного поля, транспортирующего сильнооточный электронный пучок.

В настоящей работе предлагается способ эффективной генерации мощных СВЧ-импульсов в широкой полосе частот с помощью устройства, сочетающего в себе достоинства МЛО и плазменного релятивистского СВЧ-генератора.

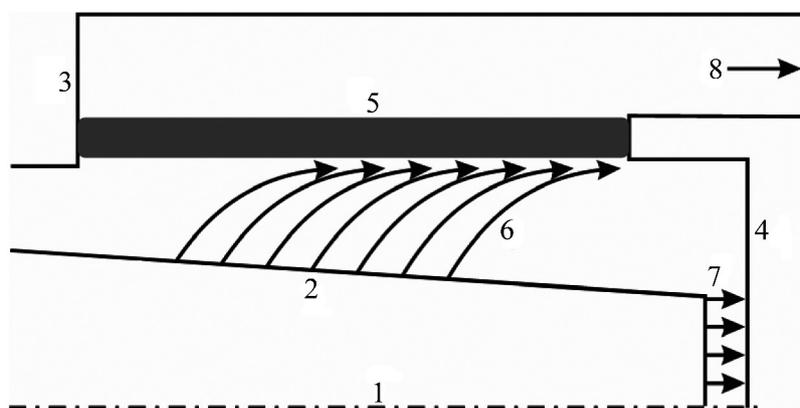


Рис. 1: PMLO: плазменный СВЧ-генератор на линии с магнитной самоизоляцией: 1 – ось симметрии; 2 – катод; 3 – анод; 4 – коллектор; 5 – плазма; 6 – электроны с боковой поверхности катода; 7 – электроны с торцевой поверхности катода; 8 – выход СВЧ-волны.

Конфигурация плазменного МЛО (PMLO), показанная на рис. 1, представляет собой МЛО, в котором пространственно-периодический волновод заменен трубчатой плазмой в волноводе с гладкими стенками. Ось 1 определяет аксиальную симметрию всей системы. На катод 2 подается импульс высокого напряжения относительно заземленных анода 3 и коллектора электронов 4. Трубчатая плазма 5 играет роль замедляющей структуры, способ ее создания описан ниже. Ток электронов с катода состоит из токов с его боковой поверхности 6 и с торцевой поверхности 7. Электроны с боковой поверхности катода 6 движутся в скрещенных полях, азимутальном магнитном поле тока катода и радиальном электрическом поле. Волна объемного заряда потока инжектиро-

ванных электронов усиливает медленную плазменную волну, которая переизлучается в волну коаксиального волновода 8. Частота выходного СВЧ-излучения зависит от концентрации плазмы.

PMLO, схематично представленный на рис. 1, отличается от MLO несколькими особенностями. Во-первых, и это главное отличие – в качестве замедляющей структуры вместо диафрагмированного волновода используется трубчатая плазма, помещенная в металлический гладкий волновод. Во-вторых, отличен принцип действия генератора: MLO работает как лампа обратной волны, а PMLO, как и все плазменные мазеры [4] – как лампа бегущей волны, т.е. усилитель с обратной связью за счет отражений волн на левой и правой границах волновода. Третьим отличием является коническая форма катода. Традиционно в конструкциях MLO используются цилиндрические катоды, первые расчеты PMLO проводились также с цилиндрическими катодами. В дальнейшем анализ форм траекторий электронов и их оптимизация с целью повышения эффективности СВЧ-излучения привели к необходимости изменения формы катода.

Потенциал катода задавался равным -500 кВ, полный ток, определяемый в значительной степени током электронов с торца катода 7 на коллектор 4, был равен примерно 25 кА. Длина плазменно-пучкового взаимодействия определялась длиной плазменного цилиндра 25 см при радиусах катода примерно 1.5 см, коллектора 4 см и анодной трубы 5.5 см. Как оказалось впоследствии, эти размеры могут быть существенно увеличены для предотвращения СВЧ-пробоев, которые в расчетах не учитывались. Полная эффективность устройства при увеличении размеров почти не меняется, поскольку создания сильного, ~ 1 Тл, магнитного поля не требуется.

Численные расчеты проводились с помощью кода Карат [5]. Совокупность инжектированных электронов задавалась как крупные частицы (PIC-методом, particle-in-cell), плазма – согласно модели Друде [6] – как неизменная по геометрии среда с определенными свойствами. По сравнению с представлением плазмы по PIC-методу такой подход дает упрощенную модель плазмы, так как учитывает только диэлектрические свойства плазмы как среды, но движение частиц не рассматривается. Тем не менее, использование модели Друде позволяет получать решения, хорошо сочетающиеся с результатами расчетов по физически более адекватному, но значительно более ресурсоемкому PIC-методу моделирования плазмы. Таким образом, метод Друде дает существенный выигрыш по времени расчета, что очень важно при поисковых исследованиях.

На рис. 2 показана зависимость потока энергии (вектор Пойнтинга) СВЧ-излучения на выходе PMLO от времени для концентрации плазмы $0.5 \cdot 10^{12}$ см³. Поток выходит

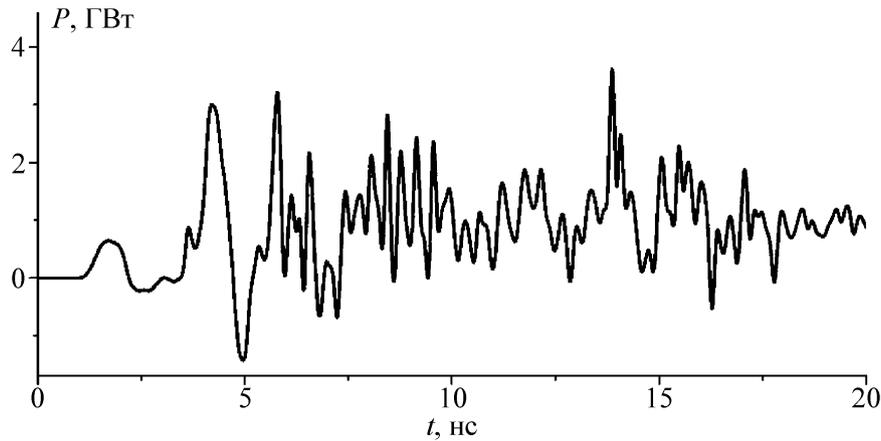


Рис. 2: Зависимость потока энергии СВЧ-излучения P от времени t при концентрации плазмы $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

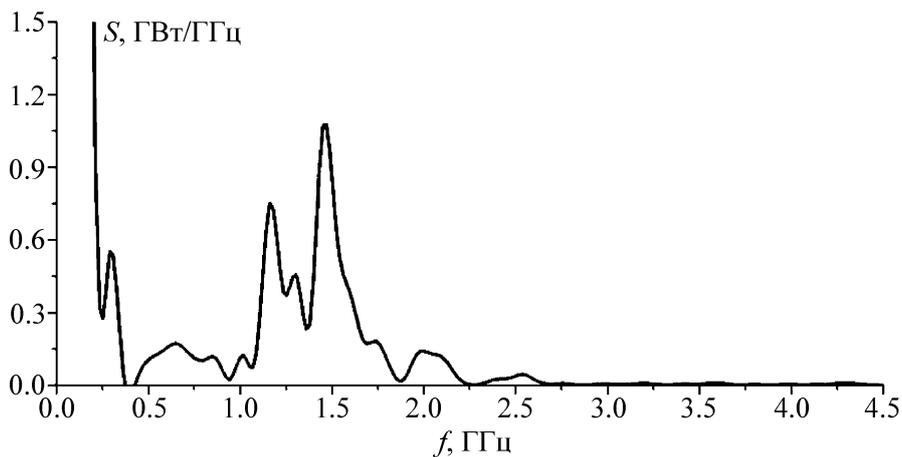


Рис. 3: Спектр СВЧ-излучения при концентрации плазмы $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

на уровень приблизительно 1.2 ГВт, что соответствует КПД 9%. На рис. 3 представлен спектр излучения, которое состоит из низкочастотной (< 1 ГГц) и высокочастотной фракций. Частота высокочастотной фракции излучения определяется концентрацией плазмы, как и во всех плазменных релятивистских СВЧ-генераторах, и в дальнейшем только эта часть излучения будет учитываться при подсчете мощности и эффективности СВЧ-генератора.

На рис. 4 показаны зависимости частоты и мощности излучения от концентрации плазмы. При изменении концентрации в диапазоне $(0.8 \dots 7.0) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ мощность высокочастотной, управляемой по частоте части излучения, остается примерно на посто-

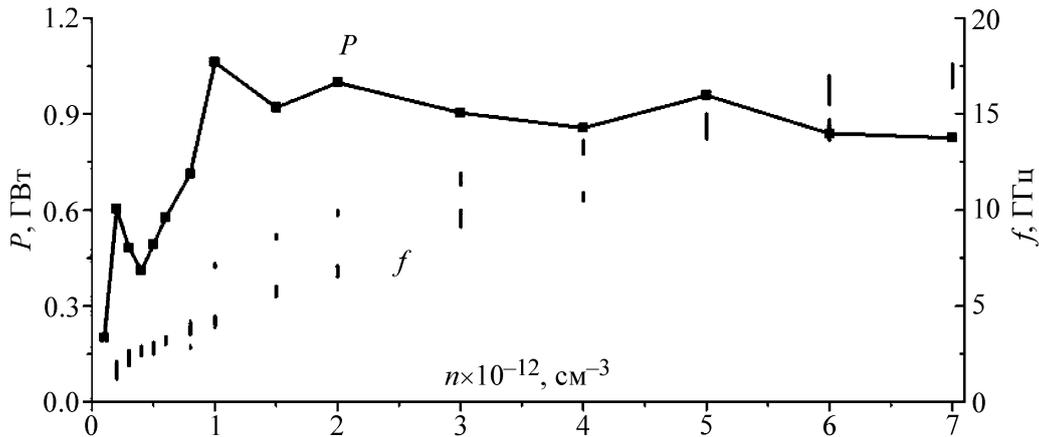


Рис. 4: Зависимости мощности P и частоты f СВЧ-излучения от концентрации плазмы n .

янном уровне ~ 0.9 ГВт, тогда как частота меняется примерно от 3 до 17 ГГц. Ширине спектра излучения соответствует длина вертикальных линий на графике, при разных концентрациях плазмы она принимает значения от 0.2 до 1.5 ГГц. Во всем диапазоне частот мощность излучения приблизительно одинакова и равна 0.9 ГВт, что соответствует КПД около 7%.

Предлагаемый способ генерации СВЧ-импульсов в широкой полосе частот не требует формирования сильноточного потока релятивистских электронов, однако требует формирования трубчатой плазмы. Такая плазма может быть создана специальным электронным пучком (600 эВ, 30 А), ионизирующим газ при давлении ~ 0.1 Па в течение 10...100 мкс [4]. Для этого необходимо продольное магнитное поле, в котором диаметр ларморовской окружности электрона с энергией 600 эВ соответствует толщине плазмы 0.5 см, т.е. индукция поля равна приблизительно 200 Гс. Это магнитное поле значительно слабее, чем в плазменных СВЧ-генераторах (~ 1 Тл), и даже меньше азимутального магнитного поля тока по катоду. Расчеты показали, что добавление такого слабого продольного магнитного поля в систему практически не меняет ни мощность, ни спектр излучения при небольшой корректировке геометрии.

Более точные расчеты, ориентированные на практическое воплощение предлагаемого СВЧ-генератора, будут проводиться с учетом указанного слабого продольного магнитного поля для всех электронов и ионов плазмы по методу крупных частиц, учитывающему их движение, как это делалось, напр., в [7]. Тем не менее, возможность создания мощного СВЧ-генератора без сильного магнитного поля, т.е. со сравнительно

высокой эффективностью и, одновременно, с широкой перестройкой частоты излучения, демонстрируется показанными здесь результатами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 13-08-00414.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. C. Clark, B. M. Marder and L. D. Bacon, Appl. Phys. Lett. **52**, 78 (1988).
- [2] С. А. Кицанов, А. И. Климов, С. Д. Коровин, ЖТФ **72**(5), 82 (2002).
- [3] Ph. Delmote, F. Bieth, S. Pinguet, in: Proc. European Electromagnetics Symposium EUROEM 2012, Toulouse, France (ONERA, Toulouse, 2012), p. 225.
- [4] O. T. Loza, A. G. Shkvarunets, P. S. Strelkov, IEEE Trans. on plasma science, **26**(3), 615 (1998).
- [5] V. P. Tarakanov, User's Manual for Code KARAT // BRA Inc. Va. USA. 1992.
- [6] P. Drude, Ann. d. Phys. **1**, 566 (1900).
- [7] С. Е. Ернылева, В. О. Литвин, О. Т. Лоза, И. Л. Богданкевич, ЖТФ **84**(8), 127 (2014).

Поступила в редакцию 24 апреля 2015 г.