

## Широкополосный плазменный релятивистский источник СВЧ-излучения с малой длительностью импульса

Д. К. Ульянов, И. Л. Богданкевич, С. Е. Ернылева, С. Е. Андреев

*Работа является продолжением цикла работ по созданию широкополосных плазменных СВЧ-излучателей на основе гладкого волновода. Рассмотрены различные методы создания СВЧ-источников. Рассматривались различные способы разрыва обратной связи для получения сплошного спектра СВЧ-излучения. Показан переход плазменного релятивистского генератора в режим усилителя шума при изменении параметров численного расчета. Результаты проведенных численных экспериментов позволяют определить параметры экспериментальных установок, которые планируется создать и исследовать в следующих работах. В случае, когда время прохождения волны по длине генератора превышает длительность импульса РЭП, спектр СВЧ-излучения сплошной. Если же время прохождения существенно меньше длительности импульса, то наблюдается излучение линейчатых спектров на частотах, при которых длина генератора кратна числу полувольт, так как генерация происходит на продольных типах волн плазменного генератора. Достигнута перестройка средней частоты излучения от 3 до 9 ГГц в обоих экспериментах на уровне мощности порядка 40 МВт.*

**Ключевые слова:** плазменный СВЧ-генератор, широкополосный, релятивистский сильноточный электронный пучок.

**Ссылка:** Ульянов Д. К., Богданкевич И. Л., Ернылева С. Е., Андреев С. Е. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 5.  
**Reference:** D. K. Ulyanov, I. L. Bogdankevich, S. E. Ernyleva, and S. E. Andreev, Prikl. Fiz., No. 6, 5 (2018).

### Введение

Плазменные релятивистские СВЧ-излучатели (генераторы и усилители) (ПРГ и ПРУ) являются отдельным классом приборов: это плазменные мазеры, основанные на взаимодействии трубчатого сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с трубчатой плазмой. Отличительной чертой плазменных мазеров является возможность перестройки средней частоты излучения в широком диапазоне частот за счет изменения плотности плазмы. Так, например, в работе [1] была достигнута 7-кратная электронная перестройка частоты излучения от импульса к импульсу на уровне мощности СВЧ-излучения 50 МВт при длительности импульса СВЧ-излучения 20 нс. В дальнейшем

были получены подобные результаты и в других частотных диапазонах как в режиме усиления, так и в режиме генерации. Наконец, в работе [2] продемонстрирована перестройка частоты излучения в частотно-периодическом режиме на частоте 50 Гц. Частота излучения в каждом из пачки СВЧ-импульсов определялась плотностью плазмы, заранее заготовленной до импульса РЭП (плотность плазмы может быть задана в каждом импульсе произвольно по любой требуемой зависимости). Достигнута 4-кратная перестройка частоты излучения в одной пачке СВЧ-импульсов.

Определённый интерес представляют исследование плазменного релятивистского генератора (ПРГ), имеющего компоновку с инверсной геометрией, которая ранее использовалась уже в нескольких работах [3–5]. Такая компоновка удобна для построения СВЧ-генераторов, работающих в частотном режиме, так как в них существенно проще обеспечить охлаждение коллектора. Вторым преимуществом такой геометрии является потенциальная возможность использования больших токов РЭП [3, 4], тогда как в классической геометрии с РЭП, расположенным внутри плазмы, удавалось использовать не более 20–30 % от величины тока, который может обеспечить ускоритель. В работах [3, 4] показано, что инверсная геомет-

---

Ульянов Денис Константинович, зав. лаб., к.ф.-м.н.  
 Богданкевич Ирина Леонидовна, с.н.с., к.ф.-м.н.  
 Ернылева Светлана Евгеньевна, н.с., к.ф.-м.н.  
 Андреев Сергей Евгеньевич, м.н.с.  
 Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
 Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.  
 Тел. 8(499) 135-63-87. E-mail: ulyanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

---

© Ульянов Д. К., Богданкевич И. Л., Ернылева С. Е., Андреев С. Е., 2018

рия может быть использована для построения ПРГ с достаточно высокой эффективностью, который может работать в частотно-периодическом или частотном режиме. Различные подходы построения усилителя на основе плазменно-пучкового взаимодействия за счет разрыва обратной связи рассмотрены в ряде работ [5, 7].

Целью данной работы в виде численного эксперимента является демонстрация возможности построения усилителя шума РЭП с инверсной геометрией за счет разрыва обратной связи и сравнение полученных данных с генератором при наличии обратной связи. Работа фактически является продолжением работы [5], в которой была предложена концепция построения усилителя шума.

### Параметры численной модели

При проведении численного эксперимента использовался электродинамический код КАРАТ [8]. Схема расчетной модели описана в [5] и показана на рис. 1. Внутри счетной области для электромагнитных полей решаются уравнения Максвелла методом конечных разностей с граничными условиями на поверхностях волновода, соответствующими идеально проводящим стенкам. В связи с цилиндрической симметрией задачи считается, что плотности плазмы и релятивистского электронного пучка, а также интенсивность электромагнитных полей не зависят от азимутальной координаты. Это, в частности, означает, что рассматривается возможность возбуждения только азимутально-симметричных мод плазменного волновода.

В расчётах выходная мощность измерялась в коаксиальном волноводе, внутренним проводником которого является коллектор (позиция 3 на рис. 1). Трубочатый электронный пучок и плазма моделируется макрочастицами (PIC-method, particle-in-cell) с фиксированным зарядом. Движение макрочастиц РЭП описывается релятивистским уравнением Лоренца. Моделирование проводилось для электронного пучка с энергией электронов 250 кэВ и током 2 кА. Рассматривались две длительности импульса, а именно, 4 и 20 нс по полувысоте, что соответствует рассматриваемым ускорителям (РАДАН-303 [6] и Терек-1). Длина плазменно-пучкового взаимодействия 30 см. В металлическом волноводе (1, рис. 1) распространяется РЭП (2, рис. 1), оседающий на стенки волновода. Вывод РЭП на стенки волновода происходит за счет подобранного профиля внешнего магнитного поля вдоль оси системы. Внутри РЭП расположена плазма (4, рис. 1), оседающая на центральный коллектор (3, рис. 1).

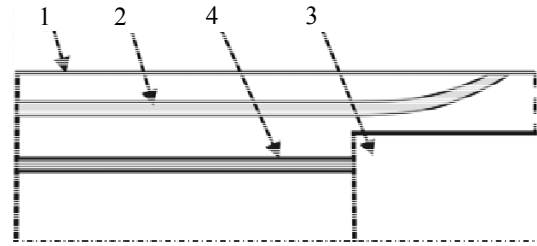


Рис. 1. Схема численного эксперимента: 1 – гладкий металлический волновод; 2 – трубочатый РЭП; 3 – коллектор плазмы; 4 – трубочатая плазма.

### Результаты численного эксперимента

В результате проведения численного моделирования были найдены режимы усиления и генерации СВЧ-излучения. Для получения режима усиления были выбраны параметры ускорителя, максимально приближенные к ускорителю РАДАН-303 [6]. Это делалось для возможности использования результатов расчета при проектировании экспериментальной установки, предназначенной для проведения физического эксперимента. Аналогично, при исследовании режима генерации использовались параметры ускорителя Терек-1 [9], на котором планируется провести предварительные исследования по генерации СВЧ-излучения.

На рис. 2 показаны спектры СВЧ-излучения в режиме генерации для двух плотностей плазмы. Длительность импульса РЭП – 20 нс.

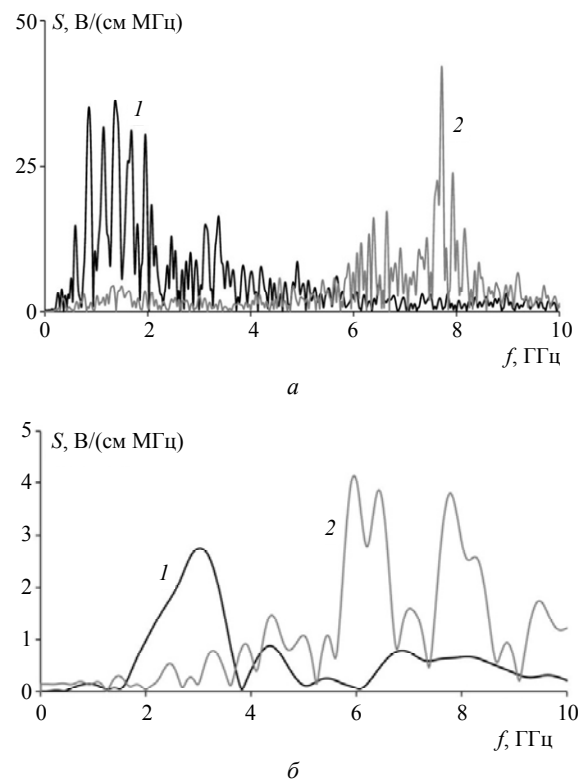


Рис. 2. Спектры СВЧ-генератора при длительности импульса РЭП 20 нс (а) и 4 нс (б) и для плотности плазмы 1 –  $4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и 2 –  $1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

На рисунке показана только высокочастотная компонента спектра, определяемая плотностью плазмы (низкочастотная компонента менее 1 ГГц, определяемая длительностью импульса РЭП, отфильтрована). Видно, что средняя частота излучения изменяется от 2 до 8 ГГц (рис. 2, а, области (1) и (2) соответственно). Средняя частота и ширина спектра определяются пространственным коэффициентом усиления плазменной волны, зависимости которого от концентрации плазмы и электродинамической структуры были подробно рассмотрены во многих работах, например, в [10]. Ширина спектра генерации на рис. 2 составляет 2–3 ГГц, что соответствует линейной и нелинейной теориям. Видно, что спектр излучения представляет собой набор узких линий, расстояние между которыми определяется длиной генератора и фазовой скоростью плазменной волны.

На рис. 3, а показана зависимость электрического поля от времени для плотностей плазмы  $4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Режим генерации неустойчив, от одного импульса к другому спектр изменяется, но средняя мощность излучения, диапазон частот и средняя частота излучения в импульсе сохраняются.

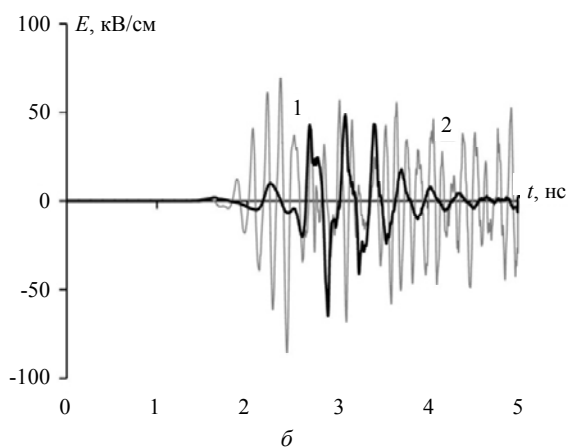
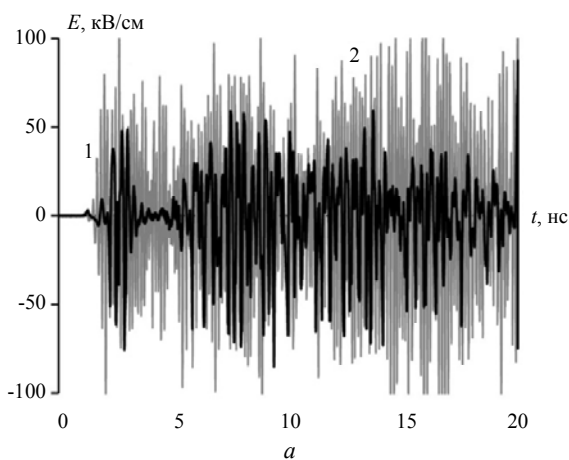


Рис. 3. Зависимость электрического поля  $E_z$  от времени при длительности импульса 20 нс (а), 4 нс (б) и для плотностей плазмы 1 –  $4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и 2 –  $1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Спектры усиления шумов РЭП в системе без обратной связи показаны на рис. 2, б. Этот режим достигался укорочением длительности импульса РЭП до 4 нс при той же длине взаимодействия. При такой длительности импульса тока РЭП плазменная волна успевала отразиться от коллектора и затем отражалась от другого конца волновода, но в этот момент импульс РЭП уже заканчивался, т. е. усиление отраженной волны было уже невозможно. Видно, что спектры рис. 2, а и рис. 2, б находятся в одном и том же диапазоне частот и средние частоты для обеих плотностей плазмы совпадают. При более высокой плотности плазмы спектр становится более высокочастотным (см. рис. 2, б, область 2), и возникает амплитудная модуляция спектра.

Зависимость электрического поля  $E_r$  от времени для импульса длительностью 4 нс представлена на рис. 3, б. Видно, что усиление волны происходит практически в течение всего импульса РЭП. При сравнении  $E_r(t)$  для импульсов 4 и 20 нс отчетливо виден переход к 6 нс от режима усиления при однопроходном режиме к режиму генерации при отражении плазменной волны (особенно для низкой плотности плазмы – область 1). К этому моменту времени волна, отраженная от начала плазменного волновода (линия инъекции РЭП), достигает коллектора (точки отражения плазменной волны). В итоге, спектр генератора включает в себя спектр усилителя за первые 4 нс и спектр генератора за время с 6 по 20 нс.

### Заключение

В численном эксперименте проведено исследование процессов усиления и генерации в пучково-плазменной системе. Релятивистский пучок взаимодействовал с плазмой в гладком металлическом волноводе. Параметры эксперимента приближены к реально существующим ускорителям, на которых планируется провести в дальнейшем физические эксперименты.

В результате проведенных исследований были получены параметры плазменных релятивистских СВЧ-генераторов для двух режимов:

- режим усилителя шума, в котором СВЧ-излучение достигалась в результате одного прохода волны без отражения

- режим генерации, в котором СВЧ-излучение генерировалось в результате 2 и более отражений волны от концов резонатора

Удалось получить мощное СВЧ-излучение на выходе из устройства для прибора без обратной связи и для плазменного СВЧ-генератора на уровне 50 МВт с возможностью перестройки средней частоты излучения от 2 до 8 ГГц при ширине полосы генерации более 2 ГГц. При этом

оказалось, что диапазоны генерируемых частот и мощность СВЧ-излучения одинаковы для обоих приборов при одной и той же плотности плазмы. Это позволит в дальнейшем проводить предварительные эксперименты по созданию усилителя на генераторе с относительно большой длительностью тока РЭП.

В численном эксперименте показан момент перехода от режима усиления к режиму генерации. Этот момент соответствует приходу отраженной от входного зеркала волны к излучающему устройству. Таким образом, определена максимальная длительность РЭП для построения усилителя шума для выбранной длины генератора. Она составила 5 нс.

Проведенные исследования позволят создать перестраиваемый по частоте (как было показано ранее, от 2 до 12 ГГц) усилитель с уровнем выходной мощности СВЧ-излучения порядка 30–50 МВт со сплошным спектром излучения с длительностью импульса несколько наносекунд. Преимуществом данного устройства будет его компактность.

*Авторы выражают благодарность Стрелкову П. С. за помощь при планировании работ в рамках данного исследования и за участие в обсуждениях полученных результатов.*

*Работа была выполнена при поддержке программы РАН № 10 "Мощные ультракороткие электромагнитные импульсы, а также их взаимодействие с объектами и средами".*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 32.
2. Лоза О. Т., Ульянов Д. К., Стрелков П. С., Иванов И. Е., Баранов Р. В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2011. Т. 38. № 4. С. 47.
3. Беховская К. С., Богданкевич И. Л., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 54.
4. Ернылева С. Е., Лоза О. Т. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 17.
5. Ернылева С. Е., Лоза О. Т. // Труды ИОФ РАН. 2016. № 72. С. 128.
6. Mesyats G. A., Korovin S. D., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I. // Proc. IEEE. 2004. Vol. 92. No. 7. P. 1166.
7. Стрелков П. С., Иванов И. Е., Шумейко Д. В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 7. С. 644.
8. Tarakanov V. P. User's manual for code KARAT. – Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992.
9. Бондарь Ю. Ф., Ковальчук В. М., Рыбалов А. М., Стрелков П. С. // ПТЭ. 1974. № 1. С. 25.
10. Кузелев М. В., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.

PACS: 52.35.-g, 94.20.wf

## The ability to create a broadband plasma relativistic noise amplifier and its transition to the generation mode

*D. K. Ulyanov, I. L. Bogdankevich, S. E. Ernyleva, and S. E. Andreev*

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: ulyanov@fpl.gpi.ru

*Received October 10, 2018*

***Plasma relativistic microwave amplifiers (PRMA) are a unique class of devices – plasma masers based on the generation of microwave radiation as a result of the interaction of a tubular high-current relativistic beam with tubular plasma. The purpose of this work is to demonstrate the possibility of building a noise amplifier in geometry with inverse geometry due to breaking the feedback, comparing the obtained data with the amplifiers with feedback. We use of a short pulse duration of REB 4 ns [5] to break the feedback in the numerical experiment. The transition from the generation mode with feedback to the generation mode without feedback will be shown. It will allow to find the optimal parameters of the future experimental setup.***

**Keywords:** plasma relativistic microwave amplifiers, broadband, high-current relativistic beam.

**REFERENCES**

1. P. S. Strelkov and D. K. Ulyanov, *Plasma Physics Report* **26** (4), 303 (2000).
2. O. T. Loza, D. K. Ulyanov, P. S. Strelkov, I. E. Ivanov, and R. V. Baranov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **38** (4), 47 (2011).
3. K. S. Bekhovskaya, I. L. Bogdankevich, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, and D. K. Ulyanov, *Plasma Physics Report* **37** (5), 1119 (2011).
4. S. E. Ernyleva and O. T. Loza, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 17 (2014).
5. S. E. Ernyleva and O. T. Loza, *Proceeding of the Prokhorov General Physics Institute* **72**, 128 (2016).
6. G. A. Mesyats, S. D. Korovin, V. V. Rostov, V. G. Shpak, and M. I. Yalandin, *Proc. IEEE* **92** (7), 1166 (2004).
7. P. S. Strelkov, I. E. Ivanov, and D. V. Shumeiko, *Plasma Physics Report* **42** (7), 653 (2016).
8. V. P. Tarakanov, *User's manual for code KARAT*. (Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992).
9. Yu. F. Bondar, V. M. Koval'chuk, A. M. Rybakov, and P. S. Strelkov, *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, No. 1, 25 (1974).
10. M. V. Kuselev, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, et al., *Plasma Physics Report* **27** (8), 710 (2001).