

## Плазменный релятивистский СВЧ-генератор с инверсной конфигурацией

С. Е. Ернылева, А. Б. Булейко, Д. К. Ульянов, О. Т. Лоза

*Впервые создан широкополосный плазменный релятивистский СВЧ-генератор на основе гладкого волновода, в котором электронный поток осаждается на стенки волновода, а плазменный волновод располагался внутри этого потока. Такая конфигурация позволяет легко охладить систему, что важно для частотно-периодического режима работы. В используемых ранее плазменных мазерах электронный поток распространялся внутри плазменного волновода и осаждался на внутренние детали конструкции. В результате они перегревались, появлялись дополнительные молекулы газа и плазма. При коротких импульсах и в режиме генерации однократных импульсов последствия перегрева существенно не влияли на работу системы. В случае же частотно-периодического режима это делает невозможной нормальную работу генератора. В традиционных плазменных мазерах отвод тепла является трудоемкой задачей, существенно усложняющей конструкцию и приводящей к снижению эффективности генерации. Целью настоящей работы было проверить работоспособность плазменного мазера, в котором электронный поток распространяется снаружи от плазмы и осаждается на стенки волновода. В работе продемонстрирована возможность электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в диапазоне 3–9 ГГц при мощности 20 МВт. Тем самым доказана возможность построения плазменного мазера с широкой перестройкой частоты излучения в периодическом режиме следования импульсов с большой частотой повторения. Данная работа является началом исследования возможности построения высокоэффективного широкополосного генератора, который сможет работать в частотном режиме длительное время.*

**Ключевые слова:** плазменный СВЧ-генератор, плазменный мазер, релятивистский сильноточный электронный пучок, РЭП, широкополосная генерация.

### Введение

Все существующие плазменные релятивистские СВЧ-генераторы и усилители – плазменные мазеры – основаны на взаимодействии трубчатой

плазмы с трубчатым сильноточным релятивистским электронным потоком (РЭП) [1].

В большинстве плазменных мазеров электронный поток распространяется внутри плазмы, поскольку такая геометрия позволяет сравнительно легко сформировать плазму без угрозы короткого замыкания диода, формирующего РЭП. Именно с такой геометрией плазменных СВЧ-генераторов, начиная с первого [2], и были получены уникальные результаты по управлению частотой излучения СВЧ-импульсов с мощностью ~50 МВт. Были продемонстрированы 7-кратная электронная перестройка частоты излучения от импульса к импульсу [3], узкий и широкий спектр излучения [4], генерация СВЧ-импульсов с частотой 50 Гц и с 4-кратной перестройкой частоты излучения [5], управление частотой СВЧ-излучения на величину до 1,5 ГГц в течение 50 нс [6].

Вследствие специфической структуры плазменной волны, вывод излучения плазменных мазеров осуществляется только по коаксиальному волноводу, центральный электрод которого явля-

---

Ернылева Светлана Евгеньевна<sup>1</sup>, научный сотрудник.  
Булейко Алла Борисовна<sup>2,3</sup>, главный специалист, аспирант.  
Ульянов Денис Константинович<sup>1</sup>, заведующий лабораторией,  
к.ф.-м.н.

Лоза Олег Тимофеевич<sup>3,4</sup>, начальник управления, профессор,  
д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. +7 (499) 503-82-16. E-mail: deul@manzanagroup.ru

<sup>2</sup> АО «Концерн радиостроения «Вега».

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, 34.

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов.

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

<sup>4</sup> НИЦ «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Статья поступила в редакцию 26 января 2017 г.

---

© Ернылева С. Е., Булейко А. Б., Ульянов Д. К.,  
Лоза О. Т., 2017

ется «продолжением» трубчатой плазмы приблизительно того же диаметра. Электронный поток, распространяющийся внутри плазмы, осаждается на этот электрод (коллектор), который перегревается, выделяет газ и существенно нарушает процесс формирования плазмы с необходимыми для работы лазера параметрами. Для подавления такого процесса приходится использовать полый коллектор сложной формы с дополнительным сильным магнитным полем и дополнительной высоковакуумной откачкой [5], что повышает сложность и энергоёмкость устройства, снижая надёжность и общий КПД.

Транспортировка РЭП снаружи плазмы применялась с целью увеличения тока РЭП и мощности излучения, плазменные СВЧ-генераторы с такой конфигурацией — впоследствии она получила название инверсной — также использовались в экспериментах, но значительно реже и значительно менее успешно. Плазменный СВЧ-генератор с инверсной геометрией [7] продемонстрировал возможность небольшого (по сравнению с [3–5]) изменения полосы генерируемых длин волн от 2,4–2,6 см до 1,8–2,5 см. В этом генераторе, как и в численных расчетах [8], была использована модель плазменного СВЧ-генератора с инверсной конфигурацией и осаждением РЭП на стенки внешнего электрода выходного коаксиального волновода, по которому сравнительно легко распределить осаждаемые электроны на значительную площадь и который легко охлаждать. Описанные в [8] эксперименты по управлению частотой СВЧ-излучения в этой конструкции успехом не увенчались. Добавим к этому, что все плазменные лазеры с инверсной конфигурацией и полым волноводом использовали в качестве ограничителя плазмы электрод, устанавливаемый внутри трубчатого РЭП на держателях. Эти держатели подвергались бомбардировке релятивистскими электронами с высокой плотностью тока и быстро разрушались, что делало использование такой схемы построения лазера неприменимой при высокой частоте следования импульсов.

Подробности устройства плазменных лазеров с разными конфигурациями описаны в [9]. Предложенный там способ построения плазменного СВЧ-генератора с инверсной конфигурацией, применимый при периодическом режиме следования импульсов с длительностью до нескольких наносекунд, подробно описан в [10]. В этой схеме построения лазера используются осаждение высокоэнергетического электронного пучка на стенки легко охлаждаемого внешнего электрода выходного коаксиального волновода и источник трубчатого РЭП без каких-либо электродов, подвергающихся быстрому разрушению при периодическом режиме следования импульсов.

Целью настоящей работы было экспериментальное доказательство того факта, что плазменный СВЧ-генератор с инверсной конфигурацией способен демонстрировать перестройку частоты излучения в столь же широком диапазоне, как и лазеры [2–6].

## Эксперимент

Эксперименты проводились на ускорителе электронов, использовавшемся в [3], с куполообразной формой однократных импульсов напряжения на катоде до 350 кВ и длительностью импульса по основанию 45 нс, причем ток электронного пучка достигал 3,5 кА. Схема эксперимента показана на 0.

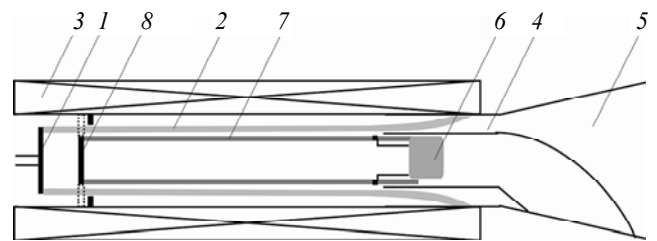


Рис. 1. Плазменный СВЧ-генератор с инверсной геометрией и осаждением РЭП на стенки волновода. 1 – взрывоэмиссионный катод, 2 – РЭП, 3 – соленоид, 4 – коаксиальный волновод, 5 – рупор, 6 – источник плазмы, 7 – плазма, 8 – ограничитель плазмы.

Взрывоэмиссионный катод 1 формирует трубчатый РЭП 2 с внутренним радиусом 2,1 см и толщиной 0,15 см, который распространяется в магнитном поле величиной 1 Тл, создаваемом соленоидом 3. В области ослабления магнитного поля электроны осаждаются на стенку камеры 4 с радиусом 3 см, являющейся внешним проводником коаксиального волновода, по которому СВЧ-излучение распространяется в выходной рупор 5. Во внутреннем проводнике коаксиального волновода 6 с радиусом 2 см расположен термокатод, формирующий трубчатую плазму 7 с внешним радиусом 1,95 см и толщиной 0,2 см. Плазма образуется путем ионизации газа при давлении 0,1 Па электронным пучком с током 0–50 А и энергией частиц 500 эВ в течение 40 мкс. Электрод 6, соединенный с внешним электродом 4, служит преобразователем излучения из ТЕМ-моды коаксиального волновода в Н<sub>11</sub>-моду полого выходного рупора.

Плазма ограничена по длине заземленным электродом 8, который крепится с помощью нескольких держателей из проводящих пластин, что не допускает импульсно-периодического режима работы устройства. Такой способ был выбран потому, что длительность импульса тока РЭП на уровне 45 нс слишком велика для применения ме-

тогда [10], предназначенного для использования при периодическом режиме следования импульсов. Тем не менее, в режиме генерации однократных импульсов использованная конструкция не препятствовала достижению указанной выше цели работы.

Спектральный состав СВЧ-излучения определялся с помощью антенны и осциллографа Tektronix DPO71604C с полосой пропускания до 16 ГГц. Полная энергия СВЧ-импульса измерялась с помощью широкоапертурного широкополосного калориметра.

На рис. 2 показаны результаты измерений частоты СВЧ-излучения в зависимости от тока источника плазмы, задающего концентрацию плазмы в очередном импульсе. Крестики на графике обозначают частоты излучения с наибольшей плотностью мощности в спектре. Рост тока от 10 А до 50 А от импульса к импульсу увеличивает концентрацию плазмы, в связи с чем частота СВЧ-излучения растет приблизительно от 3 ГГц до 9 ГГц.

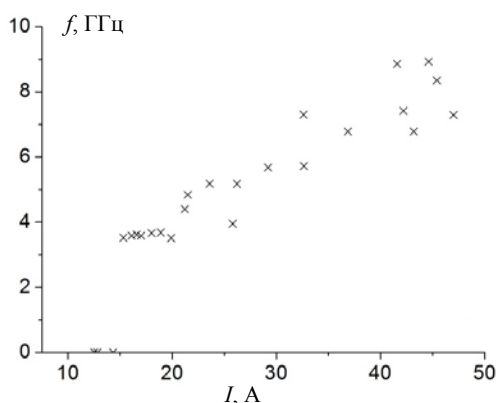


Рис. 2. Зависимость частоты излучения  $f$  от тока плазменного источника  $I$  на уровне мощности 20 МВт. Крестиками обозначены частоты излучения с наибольшей спектральной плотностью мощности.

Измеренная энергия импульсов излучения равнялась 0,4 Дж, что при длительности импульса 20 нс позволяет считать среднюю за импульс мощность равной 20 МВт (при мощности РЭП ~ 1 ГВт). Длина трубчатой плазмы была фиксирована и равна 20 см. Оптимизация тока РЭП, длины плазмы и других геометрических факторов, способных повысить электронный КПД излучения в том же частотном диапазоне от 2 % до 5 %, обычных для плазменных СВЧ-генераторов, не входила в задачи данной работы по причине дополнительных технических сложностей.

### Заключение

Особенностью всех широкополосных плазменных мазеров является вывод излучения по ко-

аксиальному металлическому волноводу, внутренний электрод которого служит одновременно коллектором сильноточного электронного пучка. Для генерации СВЧ-излучения с большой частотой следования импульсов и большой средней мощностью осаждаемого электронного пучка ранее применялся специальный коллектор. Этот коллектор требовал дополнительных устройств для вакуумной откачки и создания сильного магнитного поля определенной конфигурации, т. е. усложнял конструкцию и снижал общую эффективность и надежность.

Проведенная работа позволила существенно упростить конструкцию плазменного мазера, предназначенного для импульсно-периодического режима генерации СВЧ-излучения с большой средней мощностью. Впервые экспериментально продемонстрирован плазменный мазер с широкой (трехкратной) полосой перестройки частоты излучения от импульса к импульсу, в котором коллектором электронного пучка служит не внутренний, а внешний электрод коаксиального волновода. Продемонстрированная конфигурация плазменного мазера ориентирована на создание широкополосных источников СВЧ-импульсов со сравнительно небольшой (до нескольких наносекунд) длительностью и высокой частотой повторения вплоть до сотен герц.

Авторы работы выражают благодарность П. С. Стрелкову за помощь в решении ряда проблем, возникающих во время проведения работ, а также участия в обсуждении полученных результатов. Отдельная благодарность С. В. Гарнову за поддержку и предоставление оборудования, без которого проведение эксперимента было бы невозможно.

Работа проведена при частичной поддержке гранта РФФИ 14-08-31206.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузелев М. В., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.
2. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 4. С. 1358.
3. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
4. Богданкевич И. Л., Иванов И. Е., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
5. 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.
6. Ульянов Д. К., Баранов Р. В., Лоза О. Т., Ернылева С. Е., Богданкевич И. Л. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 10. С. 113.

7. Селиванов И. А., Стрелков П. С., Федотов А. В., Шкварунец А. Г. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 11. С. 1283.

8. Беховская К. С., Богданкевич И. Л., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 54.

9. Ернылева С. Е., Лоза О. Т. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 17.

10. Лоза О. Т., Ернылева С. Е., Городничев Е. Б., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г., Шульгина Е. А. / Патент РФ на изобретение № 2569493, рег. 29.10.2015.

PACS: 52.59.Ye

## The plasma relativistic microwave oscillator with an inverse configuration

S. E. Ernyleva<sup>1</sup>, A. B. Buleyko<sup>2,3</sup>, D. K. Ulianov<sup>1</sup>, and O. T. Loza<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> A. M. Prokhorov General Physics Institute  
38 Vavilova str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: deul@manzanagroup.ru

<sup>2</sup> Radio Engineering Corporation “Vega”  
34 Kutuzovsky prospect, Moscow, 121170, Russia

<sup>3</sup> Peoples’ Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia

<sup>4</sup> National Research Centre “Kurchatov Institute”,  
1 Academician Kurchatov square, Moscow, 123182, Russia

Received January 26, 2017

*A broadband plasma relativistic microwave oscillator on the base of smooth waveguide with plasma inside an electron flux was created. For the first time, the electrons were deposited onto the walls of the waveguide. This configuration makes it easy to cool the system, which is important for the pulse-periodic mode of operation. In the previously used plasma masers, an electron flux propagated inside the plasma waveguide and underwent deposition on the internal parts of the construction. Thus, internal parts overheated, additional molecules of gas and plasma appeared. For short pulses and in the mode of single pulses the consequences of overheating did not significantly affect the operation of the system. But in the pulse-periodic mode overheating makes impossible the operation of the generator. The means to be used for getting rid of the effects of overheating significantly complicates the design of the maser, reduces the efficiency of the entire system. The aim of this work was to check the functionality of the plasma maser in which the electron beam propagated outside the plasma and deposited on the walls of the waveguide. The electron tuning of the microwave emission frequency from one pulse to another pulse was demonstrated in the range 3 to 9 GHz at the power level of 20 MW. The result proved the possibility of plasma maser design with a broad frequency tuning range with high pulse repetition rate. This work is the beginning of the study the capability of building a highly efficient broadband oscillator that can operate in the pulse-periodic mode for a long time.*

**Keywords:** HPM, high-power microwave oscillator, plasma, relativistic high-current electron beam, broadband, UWB.

### REFERENCES

1. M. V. Kuzelev, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and A. G. Shkvarunets, Plasma Phys. Rep. **27** (8), 669 (2001).
2. M. V. Kuzelev, F. Kh. Mukhametzyanov, M. S. Rabinovich, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and A. G. Shkvarunets, JETP **56** (4), 780 (1982).
3. P. S. Strelkov and D. K. Ul’yanov, Plasma Physics Reports **26** (4), 303 (2000).
4. I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, and D. K. Ul’yanov, Plasma Physics Reports **28** (8), 690 (2002).
5. S. O. T. Loza, D. K. Ul’yanov, P. S. Strelkov, et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. **38** (4), 47 (2011).
6. D. K. Ul’yanov, R. V. Baranov, O. T. Loza, S. E. Ernyleva, and I. L. Bogdankevich, Tech. Phys. **58**, 1503 (2013).
7. I. A. Selivanov, P. S. Strelkov, et al., Plasma Phys. Rep. **15**, 1283 (1989).
8. K. S. Bekhovskaya, I. L. Bogdankevich, P. S. Strelkov, et al., Prikl. Fiz., No. 5, 54 (2010).
9. S. E. Ernyleva, O. T. Loza, Prikl. Fiz., No. 1, 17 (2014).
10. O. T. Loza, S. E. Ernyleva, E. B. Gorodnichev, I. L. Bogdankevich, and E. A. Shu’lgina, RF Patent No. 2569493, October 29, 2015.