

УДК 533.922

## Конфигурации импульсно-периодических плазменных релятивистских СВЧ-генераторов

С.Е. Ернылева, О.Т. Лоза

*Рассмотрены различные способы построения источников мощных СВЧ-импульсов на основе взаимодействия релятивистских сильноточных электронных пучков с заранее созданной плазмой. Предложена конфигурация СВЧ-генератора с минимально возможным объемом, занятым магнитным полем, и пригодная для генерации импульсов с большой частотой повторения.*

PACS: 52.59.Ye

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

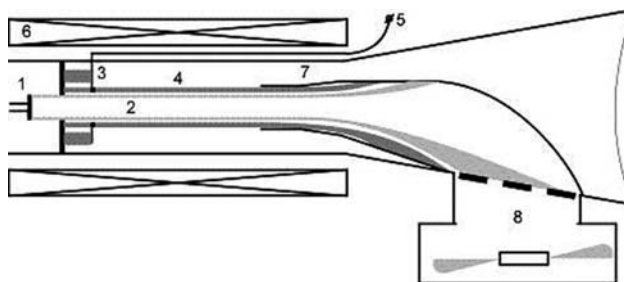
### Введение

Развитие сильноточной плазменной релятивистской СВЧ-электроники [1] вышло на этап, когда внимание исследователей стало смещаться от чисто фундаментальных проблем на особенности практического использования. Одним из главных критериев оценки СВЧ-генераторов, как и любых приборов, служит эффективность «от розетки». Все существующие сегодня плазменные релятивистские источники СВЧ-импульсов – генераторы и усилители – используют для работы сильное,  $\sim 1$  Тл магнитное поле, создаваемое соленоидами. Расход энергии на питание соленоида обычно превышает 90% от общего потребления энергии плазменным релятивистским СВЧ-источником, поэтому минимизация объема, занятого магнитным полем, является ключевой проблемой повышения эффективности. Помимо экономии электроэнергии, здесь решается и другая, не менее важная задача уменьшения нагрева и упрощения системы охлаждения. Схемы построения плазменных СВЧ-генераторов и СВЧ-усилителей в свете тематики настоящей работы одинаковы, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться плазменные релятивистские генераторы СВЧ-импульсов (ПРГ).

### Анализ схем компоновки ПРГ

Традиционной схемой компоновки узлов ПРГ является аксиально-симметричная конструкция, показанная на рис. 1. Релятивистский электронный пучок (РЭП) с током  $10^3$ – $10^4$  А и мощностью  $10^9$ – $10^{10}$  Вт генерируется на взрывоземиссионном катоде и взаимодействует с плазмой по черенковскому механизму с излучением волн, причем типичное значение КПД по мощности имеет значение 5–10%. Плазма создается заранее с помощью специального

плазменного источника, размещаемого между диодом, где формируется РЭП, и генераторной секцией, где энергия РЭП переходит в энергию плазменной волны. Основой плазменного источника служит термокатод, создающий электронный поток (600 эВ, 30 А), который в течение 30–100 мкс ионизирует газ низкого давления и создает плазму с концентрацией  $\sim 10^{13}$  см<sup>3</sup>. Трубчатая форма РЭП и плазмы наиболее удобна для их формирования и расчета параметров взаимодействия. Управление концентрацией плазмы позволяет менять частоту излучения ПРГ в пределах 2 октав и более.



*Рис. 1. Плазменный СВЧ-генератор. 1 – взрывоземиссионный катод, 2 – РЭП, 3 – источник плазмы, 4 – плазма, 5 – цепь питания источника плазмы, 6 – соленоид, 7 – коаксиальный волновод, 8 – устройство удаления десорбированного газа.*

Принципиально необходимым элементом ПРГ является центральный электрод выходного коаксиального волновода, приблизительно, равный по диаметру плазме. Только такая конструкция позволяет преобразовать медленную плазменную волну с фазовой скоростью, меньшей скорости света, в моду вакуумного волновода с минимальными отражениями в широкой полосе частот. Центральный электрод выходного коаксиального волновода может служить и коллектором пучка релятивистских электронов, обладающих значительным запасом остаточной энергии. Развал плазмы и РЭП на стенки полого волновода в постепенно ослабевающем магнитном поле (как принято осажать РЭП на коллектор в приборах релятивистской вакуумной электроники) приводит к резонансному поглощению СВЧ-излучения плазмой в области с соответствующей ленгмюровской частотой.

Ернылева Светлана Евгеньевна, мл. научн. сотр.<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.

Лоза Олег Тимофеевич, вед. научн. сотрудник<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Институт общей физики РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел.: (499) 503-8236. E-mail: oleg.loza@list.ru

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов.

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

Показанная на рис. 1 конструкция хорошо зарекомендовала себя при импульсно-периодическом режиме работы ПРГ и значительной средней мощности РЭП [2]. В этой работе применялся полый коллектор, РЭП оседал внутри него на значительной площади, поэтому охлаждение не вызывало проблем, а удаление десорбированного газа осуществлялось специальным насосом. Недостатком конструкции является то, что значительный объем, в котором создается магнитное поле, занимает плазменный источник. Этот блок включает в себя кроме термокатода еще и устройства его изолированного крепления, юстировки и соединения с источниками накала и ускоряющего напряжения. Перечисленные устройства имеют определенные размеры не только вдоль оси генератора, что заставляет увеличивать длину соленоида, но и, главное, в поперечном направлении, что часто вынуждает увеличивать его радиус. В частности, существенное превышение внутреннего радиуса соленоида над радиусом генераторной секции диктуется необходимостью расположения между ними кабелей питания плазменного источника. Понятно, что создание магнитного поля в области, где оно не является необходимым, снижает эффективность прибора в целом.

В конструкциях ПРГ с большими размерами используют составные соленоиды. Такая конструкция позволяет располагать обмотку соленоида непосредственно на генераторной секции, а элементы крепления и питания плазменного источника частично выносить за пределы соленоидов. Особую привлекательность использование нескольких соленоидов различного размера приобретает в случае малых, до нескольких наносекунд, длительностей импульса тока РЭП. Дело в том, что для генерации однородного по периметру катода электронного пучка требуется устранение эффекта экранировки центров рождения катодных факелов при взрывной эмиссии. Чтобы достичь этого для коротких импульсов требуется сильное, не менее 2–3 Тл, магнитное поле на катоде. В остальных узлах СВЧ-генератора магнитное поле может быть намного слабее.

Расположение источника плазмы в центральном электроде выходного коаксиального волновода, расположенного, в основном, вне магнитного поля, устраняет указанные трудности, связанные с подсоединением термокатода к блокам его питания. Такая конструкция в принципе возможна, однако при распространении РЭП внутри трубчатой плазмы данный подход вообще не имеет перспектив применения для импульсно-периодических ПРГ. В этом случае осаждение РЭП на внутреннюю поверхность центрального электрода выходного коаксиального волновода, занятого элементами конструкции плазменного источника, становится невозможным. Коллектор РЭП приходится размещать в виде отдельной детали, выдвинутой в генераторную секцию, причем такую деталь практически невозможно эффективно охлаждать, а десорбируемый с нее электронами газ невозможно эффективно удалять в промежутке между импульсами. В свою очередь, нарушение профиля давления газа не позволяет создавать плазму с требуемыми параметрами и генерировать СВЧ-излучение.

Другой подход был использован при создании ПРГ [3] с инверсной геометрией, при которой плазма находится

внутри трубчатого РЭП (рис. 2). Такая конструкция имеет очевидные преимущества: источник плазмы располагается в центральном электроде выходного коаксиального волновода, а соленоид имеет минимальный размер, обеспечивая сильным магнитным полем только диод и генераторную секцию. При инверсной геометрии ПРГ электроны можно осаждать на поверхность центрального электрода, но отсутствие возможности его охлаждения и десорбция газа релятивистскими электронами с поверхности коллектора в непосредственной близости от генераторной секции делает такую схему ПРГ не вполне пригодной при большой частоте повторения импульсов тока. В работе [4] был предложен метод организации коллектора РЭП при инверсной геометрии, который обычно используют в вакуумной сильноточной СВЧ-электронике. Трубчатый РЭП имел диаметр больший, чем у центрального электрода выходного коаксиального волновода, поэтому электроны распространялись между электродами волновода и оседали на стенки в ослабленном магнитном поле на некотором расстоянии от генераторной секции.

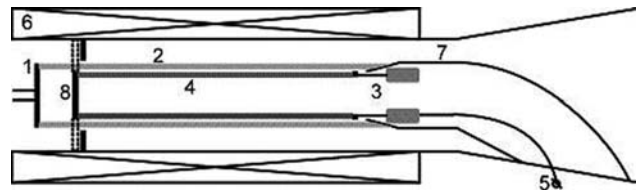


Рис. 2. Плазменный СВЧ-генератор с инверсной геометрией. Позиции 1–7 обозначают то же, что на рис. 1, 8 – кольцевая диафрагма.

Недостатком известных устройств с инверсной геометрией РЭП и плазмы является то, что трубчатый РЭП проходит через кольцевую диафрагму, которая служит ограничителем длины плазмы со стороны катода РЭП (см. рис. 2). При отсутствии такой диафрагмы плазма с концентрацией  $10^{13}$  см<sup>3</sup> закоротила бы катод ускорителя на коллектор, и формирование РЭП было бы невозможным. Внутренняя круглая часть кольцевой диафрагмы крепится на ее внешней части с помощью нескольких держателей, которые находятся на пути распространения РЭП (на рис. 2 они обозначены пунктиром). Трубчатый электронный пучок «режется», его кольцевое сечение становится сегментированным, что, в свою очередь, приводит к радиальному искажению формы РЭП по типу нелинейной стадии диокотронной неустойчивости. Кроме того, при бомбардировке держателей электронами РЭП с плотностью тока  $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup> выделяется плазма, влияющая на скорость электронов РЭП и проникающая в генераторную секцию. После сравнительно небольшого,  $\sim 10^5$  числа импульсов тока РЭП (напр., после 15 минут работы с частотой  $\sim 100$  Гц), конструкция может разрушиться.

### Возможное решение проблемы

Предлагается другое решение данной проблемы, показанное на рис. 3. Диск, ограничивающий плазму со стороны диода, крепится к катоду с помощью катушки, индуктивность которой отвечает двум требованиям. Во-первых, плазменный источник должен беспрепятственно

создавать плазму, ионизируя газ потоком электронов (600 эВ, 30 А, 50 мкс) с термокатода. Для этого катод ускорителя должен быть также соединен с корпусом установки подобной катушкой. Заметим, что в ускорителях с двойной формирующей линией такая катушка всегда имеется, через нее осуществляется заряд линии в течение ~ 100 мкс, что совпадает по порядку величины с длительностью процесса создания плазмы. Во-вторых, ток релятивистских электронов с катода ускорителя (напр., 2 кА, 500 кэВ) не должен быть шунтирован током через катушку и плазму. Для оценки можно принять, что импеданс катушки < 3 Ом существенно не повлияет на работу плазменного источника, а импеданс > 3 кОм не окажет влияния ни на работу ускорителя, ни на параметры плазмы в течение импульса тока РЭП.

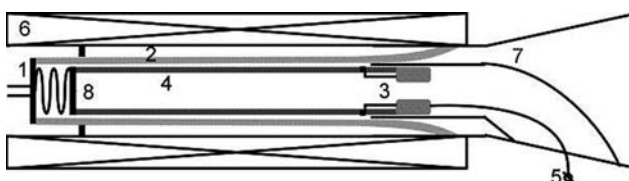


Рис. 3. Импульсно-периодический плазменный СВЧ-генератор с инверсной геометрией. Обозначения те же, что на рис. 2.

Длительность импульса плазменного источника 50 мкс существенно превышает длительность импульса ускорителя, и применение катушки для крепления центрального диска кольцевой диафрагмы тем привлекательнее, чем короче импульс тока РЭП. Для ускорителей на основе твердотельных коммутаторов [5], генерирующих импульсы с частотой до 3,5 кГц, длительность импульса не превышает 2 нс. В этом случае описанным выше требованиям удовлетворяет катушка с индуктивностью  $L = 3 \text{ кОм} \cdot 2 \text{ нс}/\pi \approx 2 \text{ мкГн}$ . Можно оценить размеры цилиндрической катушки с такой индуктивностью по приближенной формуле для длинных катушек:  $L = 10D^2n^2l$ , где  $L$  – индуктивность [нГн],  $D$  – диаметр [см],  $n$  – плотность намотки витков [1/см],  $l$  – длина [см]. Для СВЧ-генератора [2] с диапазоном частот 5–20 ГГц, обладающего минимальным среди известных ПРГ диаметром генераторной секции 3,6 см, диаметр плазмы равнялся 2 см, а длина генераторной секции – 20 см. Для  $D = 2 \text{ см}$  и намотке с плотностью  $n = 3 \text{ см}^{-1}$ , индуктивность  $L = 2 \text{ мкГн}$  достигается при длине  $l = 5,5 \text{ см}$ , т.е. при общем числе витков равном 17. Оценки показывают, что с точки зрения объема, занятого магнитным полем, такая конструкция выгоднее показанной на рис. 1 даже при увеличении длины соленоида на  $l$ .

Возможность применения катушки определяют ее электрическая и механическая прочности. Для описанной выше катушки ускоряющее напряжение на катоде ускорителя 500 кВ создает разность потенциалов ~ 30 кВ между витками проволоки с диаметром 1,5 мм, расположенными в вакууме на расстоянии 1,5 мм и электрическое поле ~ 400 кВ/см на поверхности. Вакуумный пробой при длительности импульса 100 нс вызывает напряженность поля 300 кВ/см на нержавеющей стали и 460 кВ/см на молибдене, с уменьшением длительности импульса значение пробойной напряженности поля растет. Нетрудно оценить и среднюю радиальную силу

деформации витков в магнитном поле при протекании коротких периодических импульсов тока плазменного источника. Для описанной выше катушки при частоте 1 кГц импульсов длительностью 50 мкс тока 30 А в магнитном поле 2 Тл средняя сила равна 3 Н. Такая сила не способна заметно деформировать катушку из проволоки с диаметром 1,5 мм. Проблемой, требующей специального решения, может стать остаточная деформация катушки после многих серий импульсов. Решением может быть, например, периодическое изменение направления тока в соленоидах, т.е. направлений магнитного поля и силы, но детальное рассмотрение проблемы механической прочности и методов ее решения здесь проводиться не будет.

Описанный метод ограничения плазмы со стороны диода был применен при расчете плазменного релятивистского широкополосного (4–16 ГГц) усилителя шума, подобного [6], с мощностью излучения 100 МВт и длительностью импульса 2 нс на базе ускорителя [5].

Проведенное исследование показывает, что способ оптимальной реализации плазменного релятивистского СВЧ-генератора с высокой частотой повторения импульсов зависит от конкретных параметров: длительности импульса и диапазона длин волн излучения. При небольшой длительности импульса тока ~ 1 нс оптимальной является комбинация соленоидов для создания более сильного магнитного поля на катоде и более слабого в остальных узлах прибора. Наиболее просто эта схема реализуется в нижней области диапазона частот излучения. Для экономии энергии, необходимой для создания магнитного поля, целесообразно применять инверсную геометрию, когда плазма создается внутри РЭП. В этом случае источник плазмы располагается частично вне области, занятой магнитным полем. Применение катушки для крепления ограничителя плазмы со стороны диода делает возможной импульсно-периодическую генерацию СВЧ-излучения.

### Заключение

Рассмотрены различные способы построения источников мощных СВЧ-импульсов на основе взаимодействия релятивистских сильноточных электронных пучков с заранее созданной плазмой. Предложена конфигурация СВЧ-генератора с минимально возможным объемом, занятым магнитным полем, и пригодная для генерации импульсов с большой частотой повторения.

### Литература

1. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ электроника: М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Лога О.Т., Ульянов Д.К., Стрелков П.С. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2011. Т. 38. Вып. 4. С. 47.
3. Селиванов И.А., Стрелков П.С., Федотов А.В., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 11. С.1283.
4. Беховская К.С., Богданкевич И.Л., Стрелков П.С. и др. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 54.
5. Гришин Д.М., Губанов В.П., Корвин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 19. С. 2.
6. Ernyleva S.E., Litvin V.O., Loza O.T., Bogdankevich I.L. // Вопросы атомной науки и техники. 2013. № 4(86). Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». Вып. 8. С. 3.

## Configurations for pulsed repetitively-rated plasma relativistic microwave oscillators

*S. E. Ernyleva<sup>1,2</sup> and O. T. Loza<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>General Physics Institute, RAS  
38 Vavilova str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: oleg.loza@list.ru

<sup>2</sup>Peoples' Friendship University of Russia,  
6 Miklukho-Maklai str., Moscow, 117198, Russia

*Received January 15, 2013*

***Different possibilities of construction are considered for sources of powerful microwave pulses on the base of an interaction of high-current relativistic electron beams with preformed plasma. A configuration of microwave oscillator with minimal volume occupied by magnetic field and capable for pulse generation with high repetitive rate is proposed.***

PACS: 52.59.Ye

*Keywords:* microwave oscillator, plasma, relativistic high-current electron beam.

### References

1. M. V. Kuzelev, A. A. Rukhadze, and P. S. Strelkov, *Plasma Relativistic Microwave Electronics*. (N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2002).
2. O. T. Loza, D. K. Ul'yanov, P. S. Strelkov, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **38**, No. 4, 47 (2011).
3. I. A. Selivanov, P. S. Strelkov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **15**, 1283 (1989).
4. K. S. Bekhovskaya, I. L. Bogdankevich, P. S. Strelkov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 54 (2010)
5. D. M. Grishin, V. P. Gubanov, S. D. Korovin, et al., *Tech. Phys. Lett.* **28**, No. 19, 2 (2002).
6. S. E. Ernyleva, V. O. Litvin, O. T. Loza, and I. L. Bogdankevich, *Vopr. At. Nauki Tekhn. Ser. Plasm. Elektron. Nov. Metody Uskor.*, No. 8, 3 (2013).