

12;13

Релятивистская лампа обратной волны с продольно-щелевым дифракционным выходом

© В.В. Кладухин, С.П. Храмцов, В.Ю. Ялов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: laegr@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 21 октября 2021 г.

Принято к публикации 21 октября 2021 г.

Изложены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния продольных щелей в коническом дифракционном выходе 10 GHz релятивистской лампы обратной волны с рабочей модой TM_{01} , совмещенном с коллектором электронов. Экспериментально показано, что замена сплошного конического волновода на подобный ему продольно-щелевой волновод слабо влияет на рабочие характеристики лампы. Переход от сплошного коллектора к продольно-щелевому позволяет уменьшить объем коллекторной плазмы и микрочастиц, образующихся на поверхности дифракционного выхода под действием электронного пучка, улучшить их адсорбцию и удаление.

Ключевые слова: релятивистский СВЧ-генератор, лампа обратной волны, дифракционный выход, коллектор электронов, коллекторная плазма.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51979.19039

Сильноточные релятивистские лампы обратной волны (ЛОВ) сантиметрового диапазона длин волн, использующие конусообразный адиабатический дифракционный выход, совмещенный с коллектором электронов, разрабатываются и исследуются последние несколько десятилетий [1–3]. Отмечено, что под действием падающих электронов происходит заполнение дифракционного выхода коллекторной плазмой, десорбированными газами, парами и микрочастицами материала коллектора, отрицательно влияющее на работу ЛОВ в частотных режимах, а также при формировании длинных микроволновых импульсов. Существенное изменение режимов генерации плазменно-релятивистских СВЧ-генераторов под действием плазмы, микрочастиц и ионного фона, образующихся в области коллектора под действием электронного пучка, отмечено в работе [4]. В связи с этим представляют интерес конструктивные решения, меняющие условия проявления перечисленных выше явлений, за счет перехода от сплошных волноводных систем к щелевым.

Поскольку в рассматриваемых ЛОВ используются осесимметричные волны TM -типа, имеется принципиальная возможность замены традиционно используемых сплошных осесимметричных волноводных систем на их продольно-щелевые аналоги.

Далее приведены результаты экспериментального исследования изменения рабочих характеристик ЛОВ при замене сплошного конического дифракционного выхода, совмещенного с коллектором электронов, на его продольно-щелевые аналоги, а также оценка прозрачности таких коллекторов для электронного пучка.

Эксперименты были выполнены на основе трехсантиметровой ЛОВ с рабочей модой TM_{01} , аналогичной применявшейся в [5], использующей сплошную

прямоугольно-гофрированную замедляющую волновую структуру (SWS) и резонансный рефлектор-модулятор (RRM), предложенный в [6]. Длина SWS равна 120 mm, больший диаметр гофры 32 mm, глубина гофрировки в основной части SWS 2 mm, период 15 mm, расстояние между SWS и RRM (L_{dr}) 20.5 mm. Конструктивная схема ЛОВ приведена на рис. 1, а.

В ЛОВ использовался сильноточный тонкостенный электронный пучок (*e-beam* на рис. 1, а) трубчатой формы со следующими параметрами: энергия электронов ~ 650 keV, ток пучка ~ 8 kA, длительность импульсов ускоряющего напряжения и тока электронного пучка ~ 15 ns, режим работы одиночно-импульсный. Трубчатую форму пучка обеспечивали графитовый катод (эмиттер электронов — *Cath*) с кольцевой взрывоэмиссионной кромкой и осесимметричное направляющее магнитное поле (H_0), создаваемое импульсным соленоидом (*Sol*). Для формирования наносекундных импульсов ускоряющего напряжения использовался высоковольтный генератор на основе 25-омной формирующей линии, подключаемый к 80-омному входу ЛОВ через трансформирующую линию.

На регулярном участке замедляющей системы ЛОВ магнитное поле было однородным, а его максимальное значение достигало 30 kOe. Кромка катода находилась в слабосходящемся магнитном поле, обеспечивающем небольшую компрессию электронного пучка. Диаметр эмиссионной кромки катода был равен ~ 34 mm, наружный диаметр электронного пучка в центральной части SWS составлял ~ 26 mm, толщина ~ 0.4 mm. Конусообразный дифракционный выход (*MW out*), совмещенный с коллектором электронов (*Col*), был выполнен в отдельной секции, позволяющей проводить ее замену. Вывод микроволнового излучения в атмосферу осуществлялся

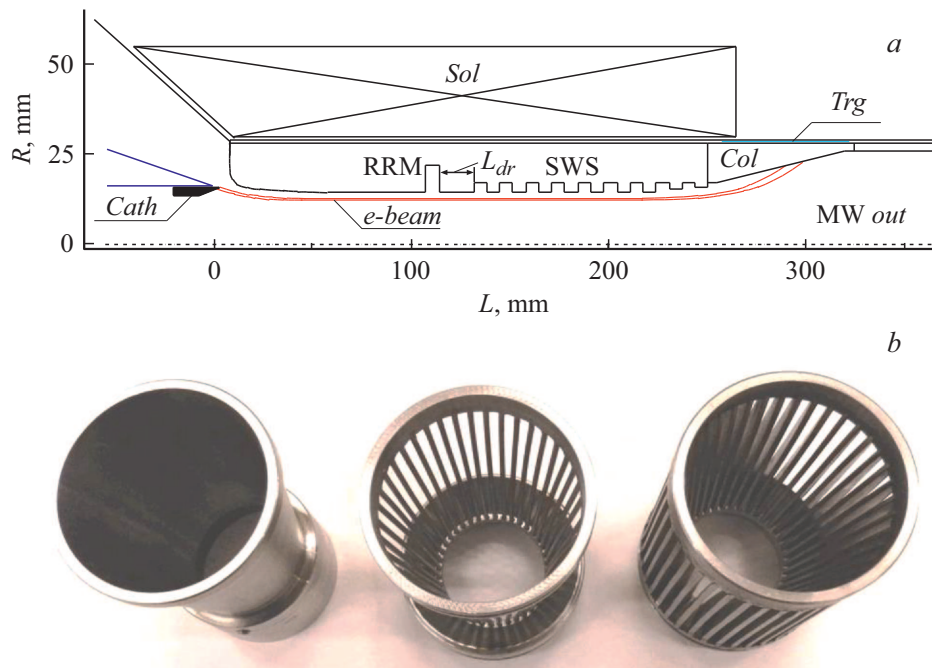


Рис. 1. *a* — конструктивная схема ЛОВ; *b* — внешний вид дифракционных выходов ЛОВ: слева — сплошной, в центре — проволочный, справа — пластинчатый.

после преобразования с помощью конвертора рабочей моды TM_{01} в моду TE_{11} и последующего формирования гауссова пучка с помощью конического рупора.

В процессе работы использовались три типа дифракционных выходов (коллекторов), выполненных из немагнитной нержавеющей стали: сплошной, пластинчатый и проволочный. Размеры всех дифракционных выходов были идентичными: входной внутренний диаметр равен 32 мм, выходной внутренний диаметр 52 мм, длина 74 мм. Проволочный выход был выполнен из равномерно расположенных по окружности 40 спиц диаметром 1.5 мм, пластинчатый — из такого же числа равномерно расположенных пластин толщиной 1.5 мм, внутренние ребра которых имели округлую форму, подобную форме спиц. Концевые крепления пластин и проволок были осуществлены путем их плавного сопряжения с переходными цилиндрами длиной ~ 7 мм, также изготовленными из немагнитной нержавеющей стали. Осаждение электронного пучка происходило на диаметре коллекторов ~ 45 – 46 мм, где отношение площади щелей к площади поверхностей проволочного и пластинчатого коллекторов составляло ~ 0.6 . Внешний вид коллекторов приведен на рис. 1, *b*.

В ходе экспериментов с помощью осциллографов регистрировались форма и величина наносекундных импульсов ускоряющего напряжения (измеряемого с помощью емкостного делителя, установленного в области катододержателя), тока электронного пучка (измеряемого с помощью установленного там же пояса Роговского) и микроволнового излучения (измеряемого

детектором на горячих электронах, установленным на расстоянии ~ 5 м от фазового центра рупора). Кроме того, регистрировались колоколообразные 18 мс импульсы тока питания соленоида, измеряемые с помощью шунта, установленного в цепи питания соленоида.

Структура электронного пучка и его поперечные размеры в рабочем пространстве ЛОВ контролировались по следам на капролоновых мишенях, а в области коллектора — по следам на мишенях (*Trg*) из винипросовой пленки толщиной 0.2 мм.

Поскольку на выходе ЛОВ с дифракционным выходом могут присутствовать высшие гармоники, способные вносить значительные искажения в показания используемого СВЧ-детектора на горячих электронах даже при относительно небольшой доле их мощности [7], перед основными измерениями их проявления были минимизированы путем изменения сдвига фаз между основной и второй гармоникой за счет изменения длины приемного волноводного тракта детектора.

Импульсы микроволнового излучения для всех вариантов дифракционного выхода регистрировались СВЧ-детектором начиная с $H_0 = 18$ кОе, при этом мощность импульсов нарастала по мере его увеличения до $H_0 = 30$ кОе. Длительность импульсов микроволнового излучения для всех вариантов дифракционного выхода находилась в пределах 6–8 нс и изменялась незначительно при смене дифракционного выхода и величины ведущего магнитного поля. Зависимости относительной мощности и длительности импульсов микроволнового излучения от величины ведущего магнитного поля при-

ведены на рис. 2, *a*. Длительность импульсов измерялась по уровню 0.5.

Характерные осциллограммы ускоряющего напряжения, тока электронного пучка и показаний микроволнового детектора при напряженности ведущего магнитного поля $H_0 = 28$ кОе для сплошного, пластинчатого и проволочного дифракционных выходов приведены на рис. 2, *b*.

Следы электронного пучка на винипросовых мишенях, устанавливаемых за пластинчатым и проволочным коллекторами, позволяющие судить об их прозрачности для электронного пучка, приведены на рис. 3.

Оценка полной мощности выходного излучения ЛОВ, выполненная по формуле $P = p_{\max} S_e$ для всех вариантов дифракционных выходов при $H_0 = 28$ кОе, составила ~ 0.9 GW. Здесь p_{\max} [W/cm²] — плотность потока энергии микроволнового излучения в центре выходного гауссова пучка, S_e [cm²] — площадь поперечного сечения гауссова пучка на уровне удельной мощности p_{\max}/e .

Проведенные эксперименты показали, что замена сплошного дифракционного выхода на его пластинчатый и проволочный аналоги незначительно влияет на форму импульса выходного микроволнового излучения и не уменьшает его мощности. Опасения по поводу того,

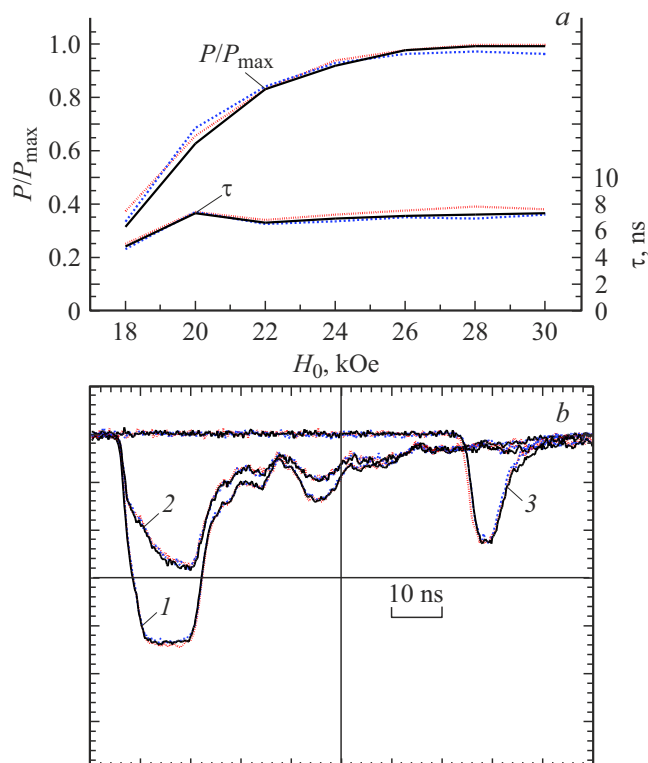


Рис. 2. *a* — зависимости относительной мощности (P/P_{\max}) и длительности импульсов микроволнового излучения (τ) от величины ведущего магнитного поля; *b* — осциллограммы импульсов: 1 — ускоряющего напряжения, 2 — тока пучка, 3 — микроволнового излучения. Сплошная линия соответствует сплошному коллектору, штриховая — пластинчатому коллектору, пунктирная — проволочному коллектору.

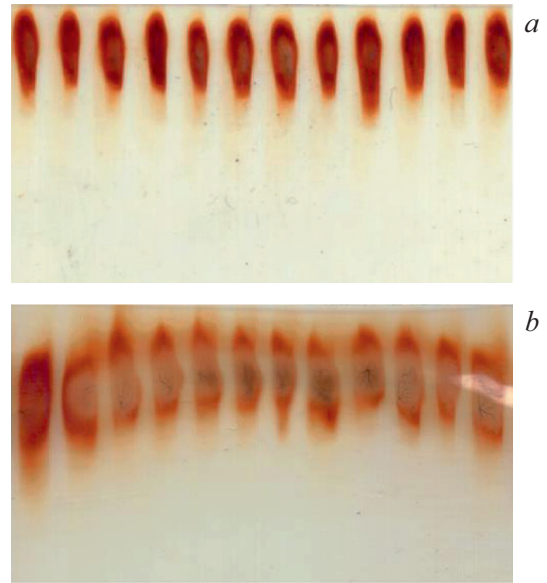


Рис. 3. Следы электронного пучка. *a* — пластинчатый коллектор, *b* — проволочный коллектор.

что от продольно-щелевых дифракционных выходов возникнут отражения, оказывающие негативное влияние на работу ЛОВ и вывод микроволнового излучения, не подтвердились.

Изучение следов на мишенях позволяет сделать вывод, что проволочный коллектор обладает существенно большей прозрачностью по сравнению с пластинчатым, что, вероятно, связано с осаждением значительной части электронов на гранях пластинчатого выхода.

Переход от сплошного коллектора к продольно-щелевому позволяет уменьшить объем и локализацию в области дифракционного выхода коллекторной плазмы, десорбированных газов, паров и микрочастиц, образующихся на поверхности коллектора под действием электронного пучка, уменьшить поверхностные отражения микрочастиц, улучшить их адсорбцию и удаление.

К достоинствам продольно-щелевых дифракционных выходов также следует отнести их фильтрующие свойства (подавление ТЕ-волн в выходном излучении).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.Ф. Ковалев, М.И. Петелин, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский, Л.Э. Цопп, Письма в ЖЭТФ, **18** (4), 232 (1973). [N.F. Kovalev, M.I. Petelin, M.D. Raizer, A.V. Smorgonski, L.E. Tsopp, JETP Lett., **18** (4), 138 (1973). http://jetpletters.ru/ps/1562/article_23909.pdf].
- [2] V.V. Rostov, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, IEEE Trans. Plasma Sci., **36** (3), 655 (2008). DOI: 10.1109/TPS.2008.923736

- [3] J. Zhang, D. Zhang, Y. Fan, J. He, X. Ge, X. Zhang, J. Ju, T. Xun, *Phys. Plasmas*, **27** (1), 010501 (2020). DOI: 10.1063/1.5126271
- [4] С.Е. Андреев, И.Л. Богданкевич, Н.Г. Гусейн-заде, О.Т. Лоза, *Физика плазмы*, **47** (3), 224 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121030021 [S.E. Andreev, I.L. Bogdankevich, N.G. Gusein-zade, O.T. Loza, *Plasma Phys. Rep.*, **47** (3), 257 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21030028].
- [5] М.Б. Гойхман, А.В. Громов, В.В. Кладухин, Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, А.В. Палицын, С.П. Храпцов, *Письма в ЖТФ*, **37** (7), 87 (2011). [M.B. Goykhman, A.V. Gromov, V.V. Kladukhin, N.F. Kovalev, N.G. Kolganov, A.V. Palitsin, S.P. Khramtsov, *Tech. Phys. Lett.*, **37** (4), 333 (2011). DOI: 10.1134/S1063785011040109].
- [6] С.Д. Коровин, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов, *Письма в ЖТФ*, **31** (10), 17 (2005). [S.D. Korovin, V.V. Rostov, E.M. Tot'meninov, *Tech. Phys. Lett.*, **31** (5), 411 (2005). DOI: 10.1134/1.1931784].
- [7] М.Б. Гойхман, Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, А.В. Палицын, *Письма в ЖТФ*, **30** (12), 28 (2004). [M.B. Goykhman, N.F. Kovalev, N.G. Kolganov, A.V. Palitsin, *Tech. Phys. Lett.*, **30** (6), 500 (2004). DOI: 10.1134/1.1773349].