

09;10

Импульсно-периодическая нестационарная релятивистская лампа обратной волны диапазона частот 38 GHz с низким ведущим магнитным полем

© А.Е. Ермаков, С.В. Жаков, Г.А. Месяц,
В.В. Ростов, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов,
В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@iep.uran.ru

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: mesyats@pran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: rostov@lfe.hcei.tsc.ru

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: zhakov@imp.uran.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2008 г.

В экспериментах и численном моделировании оптимизировались характеристики компактной релятивистской нестационарной ЛОВ 8-миллиметрового диапазона длин волн. Получена близкая к единице конверсия мощности электронного пучка в микроволновый импульс при транспортировке электронов в неоднородном магнитном поле 2.2–1.7 Т, что ниже циклотронно-резонансного значения. В режиме генерации с частотой повторения 10 Hz пиковая мощность электромагнитного импульса длительностью ~ 250 ps, составила 450–600 MW. На основании численного моделирования показана перспектива получения пиковой мощности более ста мегаватт при использовании фокусирующей системы пучка на основе высококоэрцитивных постоянных магнитов.

PACS: 07.55.Db, 07.57.Hm, 29.27.Eg, 41.85.Lc

Данная работа является логическим продолжением исследований [1–4] по нестационарной генерации в релятивистских лампах обратной волны (ЛОВ) 8-мм диапазона длин волн. В отличие от первых экспериментов [1], где использованы замедляющие системы (ЗС) в виде слабо гофрированного волновода со средним диаметром,

близким к длине волны ($d \sim \lambda$), и запердельный волновод в качестве отражателя [5], в работах [2–4] применена ЗС увеличенного поперечного сечения ($d \sim 1.3\lambda$) и резонансный рефлектор на входе [6]. Эта модификация электродинамической структуры, а также теоретический анализ электронно-волнового взаимодействия в нестационарных релятивистских ЛОВ (см., например, [7]) позволили повысить эффективность генераторов. В работе [2] была продемонстрирована конверсия мощности пучка в электромагнитный импульс ($K \sim 0.45$ и $K \sim 0.7$), различающаяся не более чем в 1.5 раза при фокусировке пучка магнитным полем в областях до и после циклотронного резонанса (~ 2 и ~ 5 Т соответственно). Дальнейшая замена импульсной магнитной фокусирующей системы (МФС) на соленоид постоянного тока с полем $B_z \sim 2$ Т и применение специального сильноточного ускорителя [8] обеспечили генерацию субнаносекундных микроволновых импульсов на частотах повторения вплоть до 1–3.5 кГц при пиковой мощности ~ 300 МВт. Конверсия мощности пучка в данном случае была ~ 0.5 [3]. Качество трубчатого электронного пучка (азимутальная однородность, толщина стенки) удалось улучшить, а распределение сопротивления связи „пучок–волна“ оптимизировать с помощью сильного ($B_z \sim 6.5$ Т) профилированного магнитного поля, создаваемого импульсным соленоидом со ступенчатым профилем сечения обмотки. Эти меры позволили в режиме редко повторяющихся импульсов получить пики СВЧ с мощностью не менее 1 ГВт и $K \sim 1.4$ [4].

Следует отметить, что во всех представленных исследованиях важную роль играло предварительное численное моделирование ЛОВ методом крупных частиц с помощью кода КАРАТ [9]. В тех случаях, когда аксиально-симметричная численная модель (геометрия, характеристики ускоряющего напряжения, профиль магнитного поля и т.п.) была максимально приближена к реальному прибору, как правило, параметры СВЧ-генерации в численном и в реальном эксперименте с точностью измерений совпадали. Этот факт мы использовали в настоящей работе, где целью являлось максимально объединить положительные моменты, продемонстрированные ранее в работах [2–4], и получить импульсно-периодическую генерацию субгигаваттных пиков миллиметрового СВЧ с высоким уровнем конверсии мощности.

Режим работы релятивистской ЛОВ с частотой повторения предполагает применение адекватной МФС. Соленоиды постоянного тока с жидкостным охлаждением и криогенные системы мы не рассматривали не только из-за сложностей эксплуатации. Проблема в том, что средний

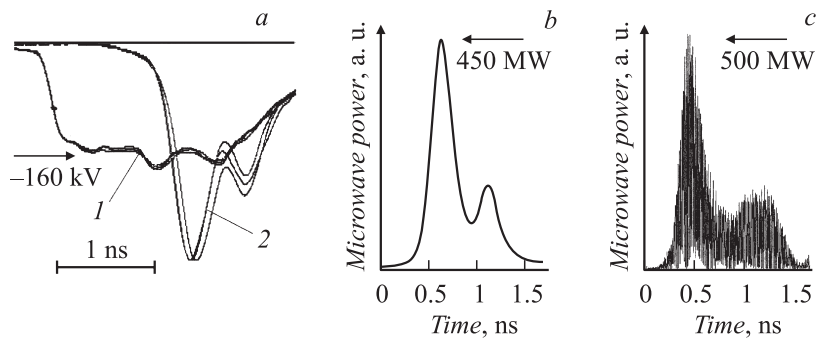


Рис. 1. *a* — осциллограммы импульса напряжения с амплитудой „полки“ — 160 kV на 45-Ω выходе высоковольтного генератора (1) и сигналы СВЧ-детектора, усредненные по 10 импульсам на частоте повторения 10 Hz (2); *b* — сигнал СВЧ-детектора, обработанный с учетом вольт-ваттной калибровки и соответствующей пиковой мощности генерации 450 MW, *c* — неусредненный поток мощности генерации с максимумом 500 MW на выходе пространства взаимодействия в численной модели ЛОВ [9].

радиальный размер обмоток таких соленоидов по известным причинам оказывается сравнимым с длиной рабочего участка магнитного поля и требуемое в этой области „тонкое“ профилирование силовой линии оказывается затруднительным. Значительно проще выполнить профилирование магнитного поля для импульсного соленоида [4], где радиальный размер обмотки и сечение проводников относительно небольшие. Разумеется, из-за высокой тепловой нагрузки частотный режим работы импульсной МФС даже при форсированном жидкостном охлаждении возможен лишь при полях „до циклотронного“ резонанса (~ 2 T), когда рассеиваемая в обмотке энергия составляет ~ 100 J за импульс. Именно для такого случая была проведена численная оптимизация нестационарной ЛОВ по ряду параметров. Это характеристики гофрировки ЗС (амплитуда, период, протяженность); положение и геометрия резонансного рефлектора; траектория пучка (силовая линия магнитного поля). При этом в модели на катод СВЧ-генератора подавался импульс напряжения, который соответствовал реальному (рис. 1, *a*, кривая 1), регистрируемому на выходе высоковольтного формирователя серии РАДАН [10]. Оптимизация нестационарной ЛОВ проводилась в ходе нескольких циклов расчетов вплоть до достижения конверсии мощности

пучка $K \sim 1$ (рис. 1, *c*). В этом режиме расчетная мощность электронного пучка составляла ~ 500 MW (270 keV, ~ 1.9 kA).

На рис. 1, *b* показана полученная в экспериментах огибающая мощности СВЧ-генерации. Это результат обработки сигнала германиевого СВЧ-детектора (рис. 1, *a*, кривая 2) с учетом его нелинейной вольт-ваттной калибровки. Как видно из сравнения рис. 1, *b* и *c*, расчетная и экспериментальная огибающие практически совпадали. Форм-фактор импульса на рис. 1, *b* и данные калориметрических измерений (по методике [3,4]) показали, что пиковая мощность генерации была в диапазоне 450–600 MW в зависимости от амплитуды ускоряющего импульса. Энергия СВЧ-излучения составляла 170–200 mJ за импульс. Уровень конверсии мощности $K \sim (0.9 - 1)$ оставался приблизительно постоянным. Заметим, что на рис. 1, *a* приведены три усредненных сигнала СВЧ-детектора, полученные в пакетных включениях (10 Hz; 1 s). В каждой серии включений амплитуда импульса варьировалась в пределах 5%, но после усреднения сигналы воспроизводились с достаточной точностью.

Распределение магнитного поля на оси импульсного соленоида, реализованное в представленном эксперименте, показано на рис. 2, кривая 1. Максимальное поле в области катода (сечение „В“) достигает ~ 2.2 T и затем спадет до ~ 1.7 T по направлению к центральной части ЗС. При изменении тока в обмотке импульсного соленоида имелась возможность наблюдать зависимость мощности СВЧ-генерации от магнитного поля. Снижение мощности на $\sim 20\%$ имело место с уменьшением максимума поля до 2 T и затем — более резко: на $\sim 70\%$ при падении поля до 1.3 T. При этом наблюдался сопутствующий рост задержки появления СВЧ-пика на выходе прибора (до 0.5 ns), что могло быть связано с ухудшением качества и уменьшением эффективного тока электронного пучка. В численном эксперименте такой быстрой деградации СВЧ-импульса не происходило. Уменьшение поля 2.2 \rightarrow 1.3 T снижало мощность генерации только на 20–25%. Это объясняется тем, что при моделировании методом крупных частиц используется приближение бесконечной эмиссионной способности катода, а трубчатый пучок азимутально однороден.

Из экспериментов и расчетов следовало, что уровень конверсии мощности пучка $K \sim 0.5$ можно получить при максимуме $B_z \sim 1.9$ T. Этот диапазон полей, в принципе, достижим, если использовать МФС с квазисоленоидальным профилем поля на основе высококоэрцитивных

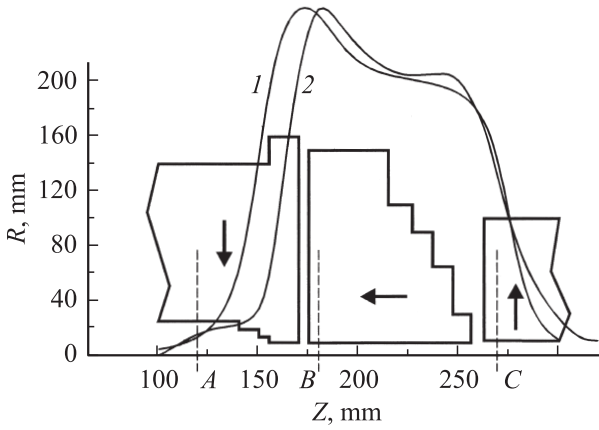


Рис. 2. Распределение магнитного поля по оси фокусирующих систем на основе экспериментального импульсного соленоида (кривая 1, максимум — 2.2 Т) и расчетной модели высококоэрцитивного постоянного магнита (кривая 2, максимум — 1.9 Т), для которой стрелками указаны направления намагниченности секций. Распределения (1) и (2) взаимно привязаны по аксиальной координате к положению катодного электрода, расположенного между сечениями *A* и *B* (показаны пунктирными линиями) и заземляющей системой (между сечениями *B* и *C*).

постоянных магнитов. Ранее мы продемонстрировали возможность создания подобной системы для сильноточного СВЧ-прибора (ЛОВ; $f = 70$ GHz) [11]. Поле $B_z \sim 1.4$ Т обеспечивалось в рабочем объеме диаметром 10 мм на участке длиной ~ 40 мм. Современные магнитные материалы позволяют рассчитывать на более высокие, чем в [11], значения остаточной намагниченности, вплоть до $B_r \sim 1.2\text{--}1.4$ Т. Как показали наши предыдущие исследования [11,12], для создания профиля поля, приближающегося к распределению $B_z(Z)$ для соленоида (рис. 2, кривая 1), оптимальным вариантом является МФС, состоящая из частей с аксиальной и радиальной ориентацией намагниченности. При этом азимутальная однородность для кольцевых радиально-намагниченных секций строго выдержана быть не может из-за их значительных радиальных размеров (≥ 120 мм). Такие секции на практике собираются из многогранников. Расчеты показали, что уже при количестве многогранников $N \geq 8$ результирующее поле отличается от поля кольцевого

магнита с радиальной намагниченностью не более чем на 5%. На рис. 2 представлен фрагмент сечения магнита, при расчете которого остаточная намагниченность полагалась равной 1.0 Т. Общая длина магнита (~ 400 мм) значительно превышает суммарную длину катодного электрода и ЗС (150 мм — между сечениями А и С), что связано с необходимостью сдвига точек реверса поля в нерабочие зоны СВЧ-генератора. Сдвиг наиболее осложнен в области катодного электрода, где диаметр канала магнита оказывается значительным: ~ 50 мм.

Показанное на рис. 2 расчетное распределение поля B_z по оси постоянного магнита (кривая 2) было использовано для аппроксимации ведущего магнитного поля в численной модели СВЧ-генератора. Этот расчет показал, что при неизменной геометрии катодного электрода и электродинамической системы ЛОВ огибающая импульса генерации аналогична показанной на рис. 1, с, а прогнозируемая пиковая мощность СВЧ-генерации составит $\sim 350\text{--}400$ МВт. Реально достижимое значение будет ниже, так как, наряду с упомянутыми ранее проблемами ухудшения однородности пучка, на практике следует ожидать дополнительного снижения рабочего тока СВЧ-прибора в связи с облегченными условиями инжекции частиц в обратном направлении — от катода к изолятору. Это обусловлено более быстрым отрывом силовой линии поля от катодного электрода по мере удаления от эмитирующей кромки.

Таким образом, в результате оптимизации параметров электронного пучка, электродинамической структуры и импульсного фокусирующего соленоида в нестационарной релятивистской ЛОВ увеличена эффективность импульсно-периодической генерации субнаносекундных СВЧ-импульсов 8-мм диапазона с пиковой мощностью ~ 500 МВт. Проведенный анализ показал возможность перехода от импульсного соленоида к фокусирующей системе из постоянных магнитов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты: 07-08-00083; 07-08-00772; 08-02-00183.

Список литературы

- [1] *Yalandin M.I., Shpak V.G., Shunailov S.A. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2000. V. 28. N 5. P. 1615–1619.*
- [2] *Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 2. С. 81–89.*

- [3] Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 24–31.
- [4] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 3. С. 68–74.
- [5] Ковалев Н.В., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // ПЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 4. С. 232–235.
- [6] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [7] Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V. et al. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. N 1. P. 016501(1)–016501(8).
- [8] Любутин С.К., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 80–88.
- [9] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT // Springfield: BRA, 1992.
- [10] Medyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V. et al. // Proc. of the IEEE. V. 92. N 7. 2004. P. 1166–1179.
- [11] Штак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р. и др. // Письма ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 1. С. 64–67.
- [12] Zhakov S.V., Raevskii E.I., Korobeinikov A.Yu., Yermakov A.E. // Proc. of the XV Int. workshop on Rare-Earth Magnet and their Applications. Dresden, Germany, 1998. V. 2. P. 875–883.