

09;10;12

## Генерация мощных микроволновых импульсов резонансной релятивистской ЛОВ с системой питания на основе взрывных магнитокумулятивных генераторов

© К.В. Горбачев, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, Е.В. Нестеров,  
С.Д. Полевин, В.А. Строганов, М.Ю. Сухов,  
Е.В. Черных, В.Е. Фортов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: polevin@ife.hcei.tsc.ru

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН

Физический институт им. Лебедева РАН

Поступило в Редакцию 27 апреля 2005 г.

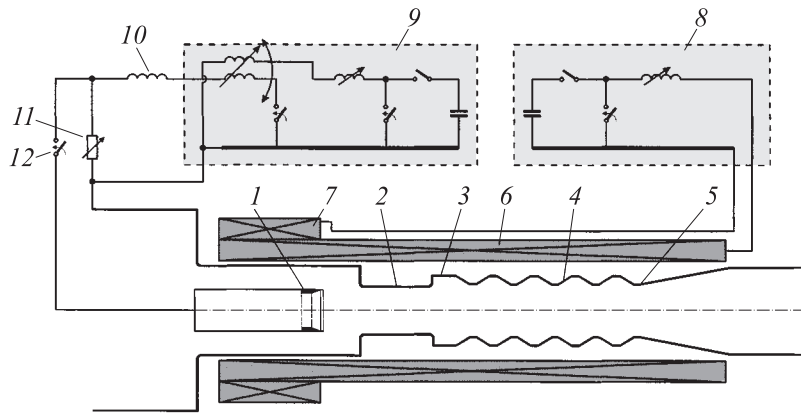
Приведены результаты экспериментов по генерации мощного СВЧ-излучения с использованием резонансной релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ), запитываемой от высоковольтного генератора на основе индуктивного накопителя и электровзрывного прерывателя тока. В качестве первичных источников энергии для высоковольтного генератора и магнитной системы ЛОВ использовались взрывные магнитокумулятивные генераторы. В экспериментах получена одномодовая генерация на частоте 3.6 GHz с пиковой мощностью 0.75 GW и длительностью импульсов 30 ns.

**Введение.** В сильноточной электронике больших мощностей в последнее время достигнут значительный прогресс в генерации импульсов электромагнитного излучения гигаваттного уровня мощности в сантиметровом диапазоне длин волн [1]. Имеется широкий спектр практических применений такого излучения в сверхдальней радиолокации, в физике и технике плазмы, в задачах воздействия на природные и технические объекты. Основой мощных СВЧ-генераторов являются сильноточные электронные ускорители прямого действия, позволяющие в режиме взрывной эмиссии [2] формировать интенсивные электронные пучки с плотностью тока  $10^3 - 10^6$  A/cm<sup>2</sup> и мощностью  $10^8 - 10^{13}$  W. Для питания как ускорителей, так и магнитных систем транспортировки пуч-

ка традиционно используются высоковольтные конденсаторные батареи, плотность запасаемой энергии в которых не превышает  $10^{-1} \text{ J/cm}^3$ . Такие системы питания являются громоздкими, сложными и дорогими для практического применения.

Конденсированные взрывчатые вещества (ВВ) обладают рекордно высокой среди доступных импульсных энергоисточников удельной энергоемкостью  $\sim 10^4 \text{ J/cm}^3$ , а существующие взрывные магнитокумулятивные генераторы (ВМГ), основанные на принципе быстрого сжатия магнитного потока проводящей оболочкой, ускоряемой продуктами взрыва, соответствуют предельным возможностям техники генерации импульсов тока и магнитной энергии [3]. Генерация импульсов тока в ВМГ осуществляется непосредственно в процессе преобразования химической энергии в магнитную. Однако при этом предъявляются жесткие требования к согласованию характеристик ВМГ и СВЧ-генератора, так как характерное время генерации импульса тока в ВМГ, с одной стороны, много больше времени протекания процессов в сильноточном ускорителе, а с другой — недостаточно велико для получения квазистационарного, однородного магнитного поля для транспортировки пучка в замедляющей структуре (ЗС), используемой в большинстве СВЧ-устройств. Ранее проведенные исследования по запитке виркатора (релятивистского генератора на основе виртуального катода) [4] и черенковского генератора [5] продемонстрировали техническую состоятельность и перспективность применения ВМГ. Целью настоящей работы являлось дальнейшее продвижение по шкале мощности СВЧ-генераторов, запитываемых от ВМГ.

**Резонансная релятивистская лампа обратной волны.** Для генерации мощных СВЧ-импульсов в настоящей работе использовалась резонансная релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ). За счет улучшения продольного распределения высокочастотного поля посредством отражения рабочей моды  $\text{TM}_{01}$  от концов электродинамической системы и оптимизации взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной волнами удалось достичь высокой эффективности генерации [6]. Важным достоинством резонансной ЛОВ в сравнении с обычной релятивистской ЛОВ является также меньшая длина пространства взаимодействия (около трех длин волн), что позволило сократить затраты энергии на создание магнитного поля. Конфигурация исследуемой ЛОВ представлена на рис. 1. Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией

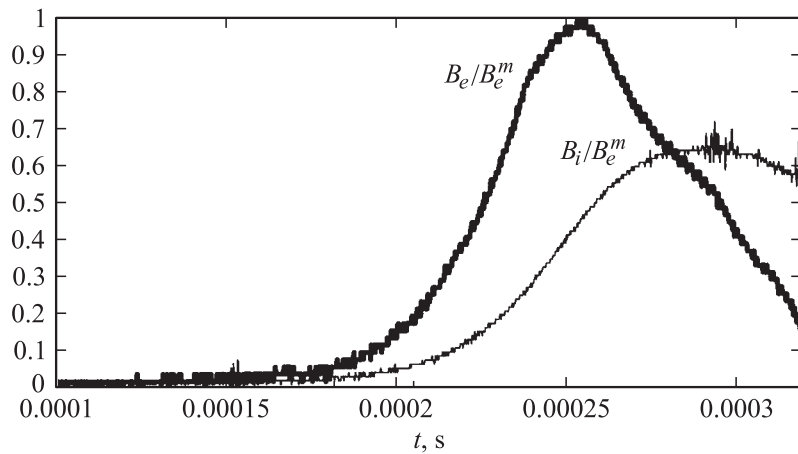


**Рис. 1.** Блок-схема эксперимента: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — запредельное сужение, 3 — вставка, 4 — замедляющая структура, 5 — выходной отражатель, 6 — соленоидальная катушка магнитного поля, 7 — корректирующая катушка магнитного поля, 8 — ВМГ для запитки соленоида с системой создания первоначального магнитного потока, 9 — двухкаскадный ВМГ с системой создания первоначального магнитного потока, 10 — индуктивный накопитель энергии, 11 — электровзрывной прерыватель тока, 12 — разрядник.

и инжестировался в электродинамическую систему через запредельное сужение 2, служащее для отражения встречной электромагнитной волны. Электроны эмитировались взрывоэмиссионным цилиндрическим графитовым катодом 1 диаметром 50 mm. Для улучшения продольного распределения ВЧ-поля и реализации оптимальных условий взаимодействия электронного пучка с  $(-1^{\text{й}})$  гармоникой встречной волны и основной гармоникой попутной волны использовалось частичное отражение рабочей моды  $TM_{01}$  от коллекторного конца 5 электродинамической системы. Отражение позволяло варьировать добротность электродинамической системы. Отрезок гладкого цилиндрического волновода 3 между запредельным сужением и началом замедляющей структуры 4 служил для подстройки оптимального сдвига фазы между основной гармоникой попутной и  $(-1^{\text{й}})$  гармоникой встречной электромагнитных волн. Отношение амплитуд гармоник на траектории электронного пучка задавалось глубиной гофрировки ЗС.

Генератор оптимизировался с использованием численного кода КАРАТ [7], в котором для моделирования движения заряженных частиц в электромагнитных полях используется метод крупных частиц. Были определены оптимальные параметры геометрии ЛОВ: период гофрировки ЗС  $0.55\lambda$ , глубина гофрировки ЗС  $0.12\lambda$ , средний радиус ЗС  $0.42\lambda$ , длина ЗС  $2.5\lambda$ , добротность электродинамической структуры 100, радиус электронного пучка  $0.3\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения. Индукция транспортирующего магнитного поля составляла 1.5 Т. Моделирование показало, что при оптимальной геометрии электродинамической системы КПД по мощности генерации, вычисленный как отношение пиковой мощности излучения к максимальной мощности пучка, инжектируемого в электродинамическую систему ЛОВ, согласно расчетам,  $\approx 30\%$  и изменяется незначительно в широком диапазоне мощностей электронного пучка. Оптимальный импеданс вакуумного диода составляет около  $100 \Omega$ .

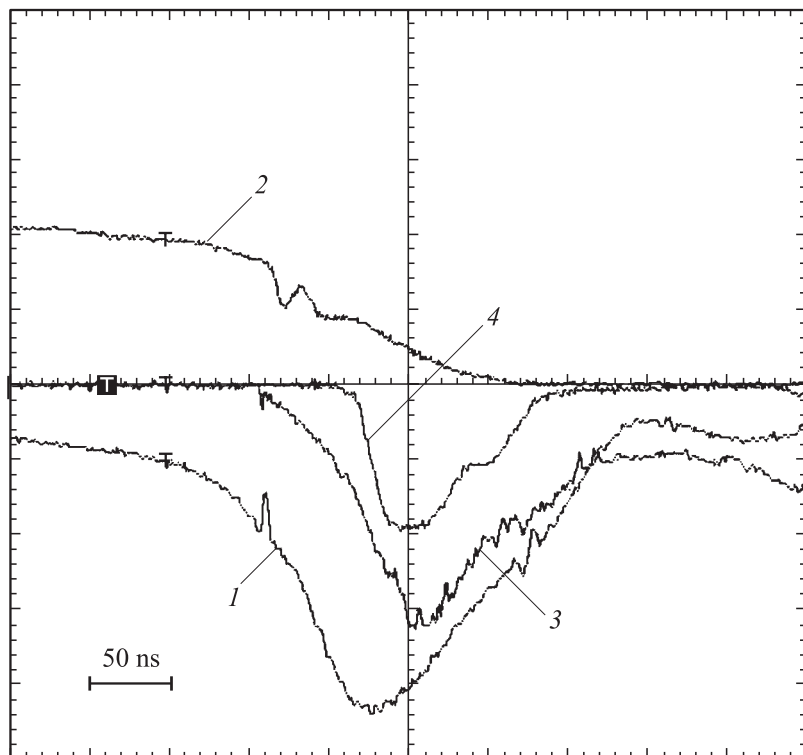
**Система генерации импульса высокого напряжения.** Как показано на блок-схеме эксперимента (рис. 1), в качестве обострителя импульса тока ВМГ 9 использовался индуктивный накопитель 10 и электровзрывной прерыватель тока 11. Для эффективной работы такого типа прерывателя необходимо обеспечить малое время накачки индуктивного накопителя. С этой целью для запитки индуктивного накопителя был разработан спиральный двухкаскадный ВМГ, использующий принцип „перехвата магнитного потока“ [8]. Первый каскад ВМГ обеспечивает основное усиление энергии, второй каскад производит формирование быстро нарастающего импульса тока в индуктивном накопителе. Диаметр рабочих спиралей ВМГ 80 mm, диаметр лайнера 40 mm, длина лайнера 400 mm, масса заряда ВВ около 400 g. Эффективное по интегралу действия тока время работы второго каскада ВМГ составляло  $3.4 \mu s$ . В качестве индуктивного накопителя использовался коаксиальный кабель длиной 16 m с индуктивностью около  $4 \mu H$ . Электровзрывной прерыватель состоял из нескольких медных проволок диаметром 0.1 mm, длиной 700 mm. Формируемый импульс высокого напряжения коммутировался на вакуумный диод с помощью газового разрядника, настроенного на напряжение 300–400 kV. Основные положения по выбору оптимальных параметров такой системы генерации высоковольтных импульсов рассмотрены в [9].



**Рис. 2.** Временные зависимости индукции магнитного поля на оси замедляющей структуры  $B_i$  и снаружи ее  $B_e$ , нормированные на максимальное значение индукции магнитного поля на внешней границе замедляющей структуры  $B_e^m$ .

**Магнитная система ЛОВ.** Основная сложность формирования однородного магнитного поля внутри ЗС состоит в соизмеримости времени процесса проникновения магнитного поля с характерным временем работы ВМГ. Для решения этой самосогласованной задачи было проведено численное (с использованием результатов работы [9]) и физическое моделирование. На основании результатов моделирования определены параметры специального ВМГ и соленоида. Проведенные измерения временного и пространственного распределений индукции магнитного поля внутри ЗС позволили выбрать оптимальный момент инжекции электронного пучка, соответствующий наиболее однородному распределению магнитного поля внутри ЗС.

В качестве источника тока соленоида и корректирующей катушки с общей индуктивностью около  $4 \mu\text{H}$  использовался специально разработанный высокоиндуктивный многосекционный спиральный ВМГ. Спираль генератора диаметром  $90 \text{ mm}$  состояла из 5 секций общей длиной  $400 \text{ mm}$ , лайнер имел диаметр  $40 \text{ mm}$ , масса заряда ВВ  $250 \text{ g}$ . Для увеличения времени проникновения поля скорость детонации



**Рис. 3.** Оциллограммы напряжения  $1$  и тока  $2$  на прерывателе, тока пучка  $3$  и сигнала с микроволнового детектора  $4$ .

заряда ВВ была снижена до  $3.8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ . Полное время работы ВМГ составило  $136 \mu\text{s}$ , максимальный ток более  $100 \text{ kA}$ .

На рис. 2 приведены временные зависимости индукции магнитного поля на оси ЗС ( $B_z$ ) и индукции в зазоре между ЗС и соленоидом ( $B_e$ ). Амплитуда индукции магнитного поля в центре ЗС  $B_z^m \approx 1.5 \text{ T}$ . Для улучшения магнитной изоляции пучка электронов в магнитной системе была предусмотрена коррекция поля с помощью одновитковой катушки  $7$ , последовательно включенной в цепь основного соленоида.

**Результаты экспериментов.** При настройке резонансной ЛОВ на оптимальный режим генерации (варьировался импеданс вакуумного диода и место высадки электронного пучка на коллектор) применялись емкостные накопители энергии, после чего были проведены эксперименты с питанием от ВМГ. Синхронизация работы обоих ВМГ, с тем чтобы электронный пучок проходил в наиболее однородном магнитном поле, осуществлялась с помощью взрывной линии задержки.

Измерение параметров микроволнового излучения производилось с использованием направленного ответвителя в выходном тракте генератора и калиброванного детектора, а также широкоапертурного калориметра [10].

В оптимальном режиме генерации при токе в индуктивном накопителе в момент переключения тока в нагрузку 35 кА, напряжении на катоде 750 кВ, токе кольцевого пучка электронов 9 кА пиковая мощность СВЧ-излучения составила 0.75 GW при длительности импульса излучения на полувысоте около 30 ns. На рис. 3 представлены осциллограммы напряжения и тока на прерывателе, тока электронного пучка и сигнала с микроволнового детектора.

Частота генерации (3.6 GHz) и диаграмма направленности излучения достаточно хорошо соответствовали возбуждению  $TM_{01}$  моды круглого волновода. Следует отметить, что в эксперименте имел место обратный ток утечки электронов на анод  $\approx 2$  кА. КПД генерации по мощности составил около 14%.

## Список литературы

- [1] Korovin S.D., Rostov V.V., Polevin S.D., Pegel I.V., Schamiloglu E., Fuks M.I., Barker R.J. // IEEE, Special Issue on Pulsed Power: Technology and Applications. 2004. V. 92. N 7. P. 1082–1095.
- [2] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [3] Павловский А.И., Людаев Р.З. // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики / Под ред. Александрова А.П. Л.: Наука, 1984. С. 206–217.
- [4] Азаркевич Е.И., Диденко А.Н. и др. // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 2. С. 353–355.
- [5] Вродский А.Я., Вдовин В.А., Кравченко А.С., Черепенин В.А. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 314. № 4. С. 846–849.

- [6] *Kitsanov S.A.* et al. // Proc. of the 14th Int. Conf. On High Power Particle Beams, Albuquerque. 2002. P. 255–258.
- [7] *Tarakanov V.P.* // User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [8] *Давыдов В.А., Чернышов В.К.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1981. № 6. С. 112–119.
- [9] Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002. 255 с.
- [10] *Лисичкин А.Л., Нестеров Е.В., Строганов В.А.* // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 82–84.