

09;10

Субнаносекундный источник импульсов излучения в диапазоне 38 GHz с импульсной мощностью 1 GW

© С.Д. Коровин, 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@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

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

Поступило в Редакцию 14 июля 2003 г.

Исследуется режим возбуждения субнаносекундных СВЧ-импульсов высокой мощности в черенковском приборе с протяженной периодической замедляющей системой и электронным пучком компактного сильноточного ускорителя (290 keV, 2.3 kA, 1 ns). Найдены условия, для которых конверсия мощности может достигать 1.5 при выходной мощности импульса излучения до 1.2 GW и длительности 200 ps.

В результате выполнения серии теоретических и экспериментальных исследований [1–5], посвященных изучению нестационарных режимов в релятивистских электронных СВЧ-приборах, была показана возможность получения электромагнитных импульсов с пиковой мощностью, которая принципиально не ограничивается мощностью пучка. Данное направление релятивистской электроники имеет привлекательные физические аспекты преобразования энергии из одного вида в другой, а с другой стороны, соответствует наиболее полной реализации возможностей компактных сильноточных ускорителей. Параллельно с выполнением экспериментов [2–5] развивались теоретические представления и численные методы, так что были созданы предпосылки для существенного повышения энергетического КПД и коэффициента конверсии мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Данной задаче и посвящена настоящая работа.

Исследовался черенковский электронный генератор диапазона 38 GHz, представляющий собой протяженную периодическую замед-

ляющую систему (ЗС) с синхронной электронам пространственной гармоникой встречной волны TM_{01} . Для проведения эксперимента потребовалась существенная модернизация экспериментальной установки, использованной в работе [2].

Электронный ускоритель на основе компактного высоковольтного генератора РАДАН-30ЗБП с емкостным накопителем в виде двойной формирующей линии (ДФЛ) был усовершенствован в плане стабилизации импульсов ускоряющего напряжения. В качестве коммутатора ДФЛ использовался управляемый высоковольтный разрядник с искажением поля вблизи заземленного электрода [6], обеспечивающий запуск генератора с полным временным разбросом не более 50 ns при времени импульсной зарядки накопителя 8 μ s. В результате стабилизировался пробой неуправляемого азотного разрядника — обострителя в дополнительном индуктивно-емкостном звене сжатия [7], формировавшем ускоряющий импульс с выраженной квазиплоской вершиной длительностью 0.9 ns и фронтом 200 ps (рис. 1). Кроме задачи стабилизации, управляемый запуск основного разрядника обеспечил возможность работы без пропусков срабатывания при напряжении 190–195 kV, близком к максимальному зарядному. Таким образом, при том же напряжении на катоде, что и в работе [2] (~ 290 kV), удалось увеличить ток в электронном диоде ускорителя на 10–15% и тем самым поднять мощность пучка для 670–700 MW.

Параметры инжектора электронов и геометрия диода были перенесены в численный эксперимент, выполнявшийся с использованием программы KARAT [8]. Для заданных параметров пучка требовалась оптимизация геометрии ЗС, а также напряженности и конфигурации магнитного поля, транспортирующего электронный поток. При выборе геометрии ЗС и продольного распределения сопротивления связи пучка с синхронной волной учитывались выводы из численного анализа одномерной модели [4]. В результате оптимизации была выбрана геометрия ЗС со средним диаметром 1.3λ и длиной 25 периодов (рис. 2, *a*). Для отражения электромагнитного импульса со стороны катодного края ЗС устанавливался сосредоточенный широкополосный рефлектор [9], отражающий не менее 95% энергии импульса. В соответствии с рис. 2, *b* расчетная пиковая мощность в электромагнитном импульсе могла превышать 1 GW, а конверсия мощности достигала 1.7. Наилучшие результаты расчетов были получены при использовании достаточно сильного магнитного поля (6.5 T) и его профилирования (рис. 2, *c*),

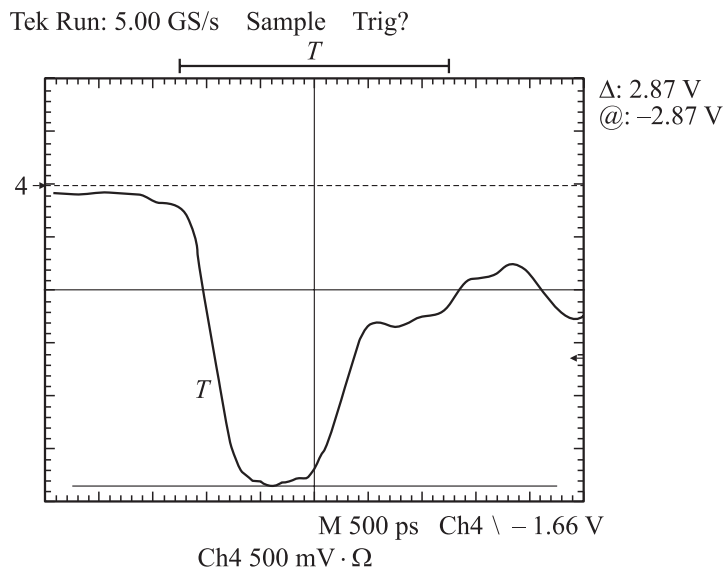


Рис. 1. Осциллограмма импульса ускоряющего напряжения, регистрируемая цифровым осциллографом Tektronix TDS684B с переходной характеристикой 350 ps.

необходимых для обеспечения качественной транспортировки пучка, вблизи стенок ЗС. За счет декомпрессии пучка на входном участке соленоида (рис. 2, *d*) сопротивление связи с катодного края ЗС было дополнительно понижено. Пучок отодвинут от гофрировки в области наибольших значений электромагнитного поля генерируемой волны, вызывающего интенсивные поперечные осцилляции и существенные потери электронов на стенки ЗС (как это имеет место в случае однородного магнитного поля).

При изготовлении многослойного соленоида особое внимание было уделено требованию на отклонение оси витков обмотки и ее соосности с ЗС (не хуже 0.1 mm). В процессе калибровки импульсной магнитной системы учитывалось ослабление поля из-за влияния скин-эффекта. Импульсное магнитное поле измерялось индуктивным датчиком вдоль оси электронно-оптической системы в первом максимуме по времени,

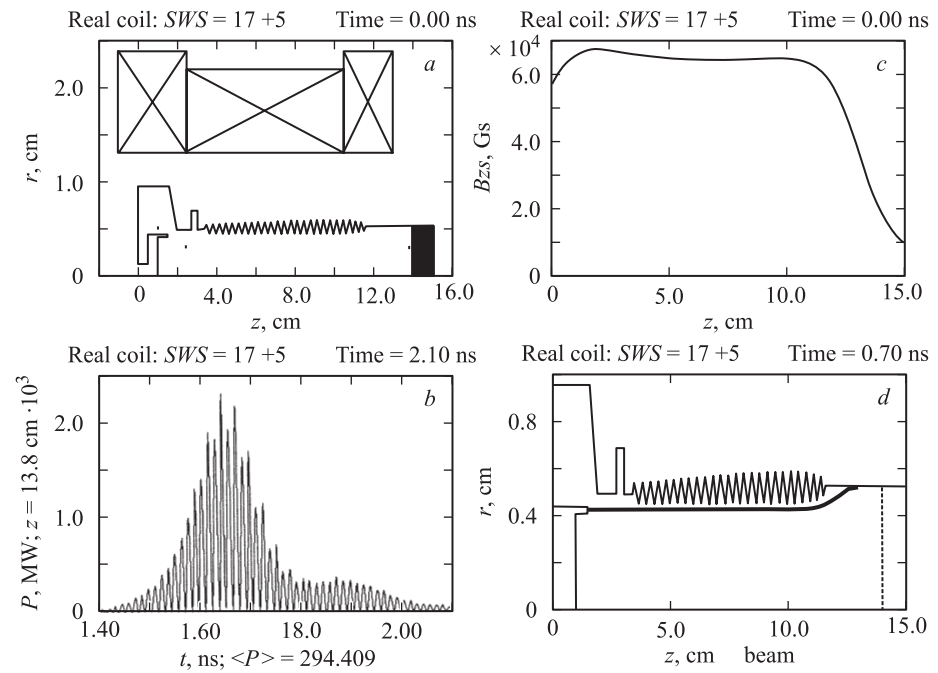


Рис. 2. Результаты численного моделирования субнаносекундной релятивистской ЛОВ: *a* — геометрия электронного инжектора, фокусирующего соленоида и замедляющей системы; *b* — усредненный поток мощности СВЧ-импульса; *c* — распределение магнитного поля соленоида на оси системы; *d* — траектория трубчатого электронного пучка.

с которым синхронизировался электронный пучок. Реальная конфигурация силовой линии учитывалась при коррекции диаметра трубчатого графитового катода. В эксперименте пауза между импульсами ускорителя (60 s) определялась нагревом обмотки соленоида.

Для контроля параметров генерируемых субнаносекундных СВЧ-импульсов применялись детекторные и калориметрические измерения. Неохлаждаемый германиевый детектор на горячих носителях и калориметр были идентичны использованным в работах [2,5]. Диаметр измерительного капилляра в калориметре составлял $200\ \mu\text{m}$. Калибровка в диапазоне 50–500 mJ показала линейность отклика с точностью не хуже 5%. Чувствительность составила $8\ \text{mm/J}$, что при наблюдении капилляра в оптический микроскоп позволяло уверенно регистрировать поглощенную энергию СВЧ-импульсов в диапазоне 300–400 mJ. Огибающая СВЧ-импульса с детектора регистрировалась осциллографом С7-19 с полосой регистрации 5 GHz. Развертка осциллографа и вертикальная чувствительность трубки калибровались тестовым импульсом генератора Г5-84 с фронтом 90 ps при параллельной регистрации опорного сигнала цифровым стробоскопическим осциллографом Tektronix-TDS820 с полосой 6 GHz. Эта же техника использовалась для калибровки кабельного регистрационного тракта детектора и линии задержки осциллографа С7-19, в качестве которых применялся микроволновый полужесткий кабель RG405. Как и в работах [2,5], для регистрационных трактов с помощью калибровочных измерений реального времени были определены коэффициенты амплитудного ослабления, уширение и затягивание фронта тестовых импульсов, с 5-процентной точностью моделировавших временные характеристики наблюдаемых в эксперименте сигналов с СВЧ-детектора. С учетом детальной калибровки нелинейной характеристики СВЧ-детектора предпринятые меры позволили провести расчет форм-фактора огибающей СВЧ-мощности и с точностью не хуже 20% определить пиковую мощность субнаносекундного СВЧ-импульса 8-миллиметрового диапазона (рис. 3). Для типичных показаний калориметра в 300–410 mJ эта величина составила 0.9–1.25 GW.

Отметим соответствие результатов эксперимента и численного моделирования. Длительность СВЧ-импульса гигаваттного уровня мощности составила не более 200 ps на полувывоте. С указанной выше точностью измерений коэффициент конверсии мощности электронного пучка в СВЧ-излучение достигал 1.5 ± 0.2 . Примечательно, что в этом случае плотность потока мощности излучения в электродинамической

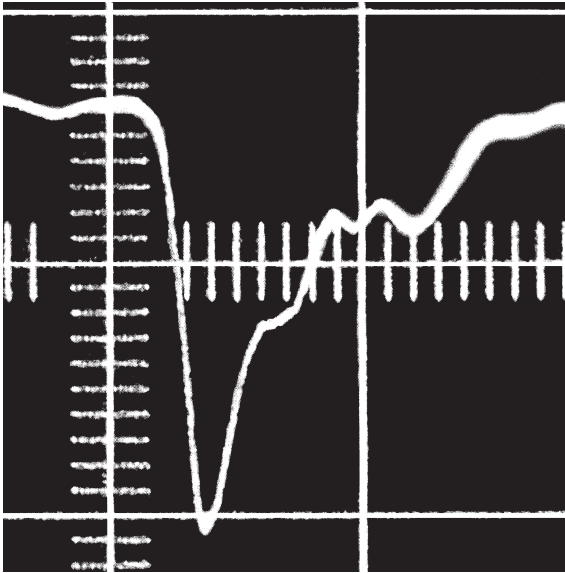


Рис. 3. Типичный импульс с фронтом 120 ps, регистрируемый с германиевого СВЧ-детектора на экране осциллографа С7-19. Развертка — 1 ns/div. При обработке с учетом нелинейности детектора длительность на полувысоте — не более 200 ps.

структуре могла составлять $\sim 1.5 \text{ GW/cm}^2$. Эффективность преобразования энергии в системе „пучок–электромагнитная волна“ для исследованного микроволнового источника можно оценить в 20–30%.

Высоковольтный генератор ускорителя (РАДАН-303БПМ) предусматривает возможность импульсно-периодического режима с частотой повторения до 100 Hz. В случае использования гибридного модулятора [10] частота повторения может достигать 3500 Hz [5]. Такие режимы работы перспективны при использовании сверхпроводящего соленоида. Учитывая, что представленный эксперимент выполнен на основе компактного высоковольтного ускорителя, созданный микроволновый источник может использоваться для решения ряда исследовательских и прикладных задач.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 01–02–17029.

Авторы выражают признательность Н.С. Гинзбургу за внимание к работе и А.И. Климову за полезные консультации.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. // ПЖТФ. 1999. Т. 25. В. 23. С. 8–15.
- [2] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. // ПЖТФ. 2002. Т. 28. В. 2. С. 81–89.
- [3] Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Пегель И.В. и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. Т. 46. № 3–4. С. 55–65.
- [4] Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Ростов В.В. и др. // ПЖЭТФ. 2003. Т. 77. В. 6. С. 314–318.
- [5] Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // ПЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 24–31.
- [6] Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Proc. of the 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA. 1995. P. 544–549.
- [7] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [8] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc., 1992.
- [9] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [10] Любутин С.К., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 80–88.