

09;10;12

Генерирование субнаносекундных импульсов излучения диапазона 10 GHz с высокой пиковой и средней мощностью

© С.Д. Коровин, С.К. Любутин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов,
С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, М.Р. Ульмаскулов,
К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: rostov@ife.hcei.tsc.ru
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 18 марта 2004 г.

Исследован режим возбуждения СВЧ-импульсов диапазона 10 GHz длительностью 0.8 ns с пиковой мощностью ~ 2 GW в релятивистском генераторе встречной волны с протяженной периодической замедляющей системой. Для формирования сильноточного пучка электронов (3 GW, ~ 600 keV, ~ 5 kA, 7 ns) с частотой повторения 700 Hz в пакетах по 1 s был разработан ускоритель на основе высоковольтного генератора с индуктивным накопителем энергии, полупроводниковым прерывателем тока и обостряющим водородным разрядником. За счет оптимизации режима взаимодействия полей и частиц достигнута средняя мощность 2.5 kW в СВЧ-импульсах при пониженных значениях транспортирующего магнитного поля в области до циклотронного резонанса.

Экспериментальные исследования нестационарных режимов генерации мощного электромагнитного излучения в релятивистских СВЧ-генераторах типа лампы обратной волны (ЛОВ) [1–6] подтвердили теоретические выводы [7–9], согласно которым, в случае значительного превышения тока электронного пучка над стартовым значением, возможно возбуждение короткого в масштабе длины пространства взаимодействия пика излучения. При определенных условиях его уровень мощности не ограничен мощностью электронного потока. Длительность огибающей формируемого импульса на полувысоте обычно не превышает десяти периодов высокочастотного заполнения, поэтому существенно возрастает электропрочность замедляющей системы (ЗС) и можно

использовать компактные сильноточные ускорители с длительностью тока в несколько наносекунд.

До постановки данной работы нами были исследованы режимы генерации редко повторяющихся гигаваттных субнаносекундных СВЧ-импульсов диапазона 10 GHz [4,6]. В этих экспериментах при высоких значениях транспортирующего магнитного поля ($B_z \approx 2.5-3$ Т, т.е. выше циклотронного резонанса со встречной волной) достигнута конверсия мощности электронный пучок–СВЧ-излучение $K \approx 1.4-1.8$ в импульсах с мощностью до 3 GW. Аналогичный режим был реализован в работе [5] для компактного генератора диапазона миллиметровых волн ($B_z = 6.5$ Т; $K = 1.5$). В случае генерирования субнаносекундных СВЧ-импульсов диапазона 38 GHz и фокусирующего поля $B_z = 2$ Т (что ниже циклотронно-резонансного значения) в работе [3] на основе специально разработанного гибридного модулятора для формирования стабильных ускоряющих импульсов [10] реализована частота повторения импульсов до 3500 Hz и коэффициент конверсии около 0.5. В настоящей работе ставилась задача изучения возможности повышения конверсии в относительно низких магнитных полях и создания источника субнаносекундных гигаваттных электромагнитных импульсов диапазона 10 GHz, генерируемых с высокой частотой повторения импульсов.

Как это следовало из результатов упомянутых выше исследований, основной фактор, ограничивающий конверсию мощности в низких магнитных полях, связан с эффектом раскачки интенсивных поперечных осцилляций электронов в полях встречной электромагнитной волны. Данный эффект усиливается на фоне „не лучших“ структурных характеристик электронного потока, формируемого взрывоэмиссионным инжектором в слабом магнитном поле. Так, для диапазона 10 GHz и энергий частиц порядка 500 keV существует достаточно узкий диапазон рабочих магнитных полей ниже циклотронного резонанса (с индукцией 0.5–0.6 Т), в котором можно сформировать электронную трубку с приемлемыми поперечными осцилляциями частиц. Снижение магнитного поля от указанного диапазона приводит к ухудшению структуры формируемого пучка, а наращивание бесполезно в силу возрастания поперечных осцилляций электронов в электромагнитной волне вплоть до потерь тока на стенке. Однако задача облегчается, если использовать декомпрессию электронного потока, помещая взрывоэмиссионный катод в более сильное поле и расширяя пучок перед входом в ЗС, где поддерживается пониженный уровень фокусирующего поля [11].

Другая идея, используемая в данной работе, заключалась в том, чтобы оптимальным образом распределить вдоль всей длины ЗС темп отбора энергии от электронного пучка, обеспечив локализацию максимальной амплитуды ВЧ-полей набегающего импульса в начале ЗС. Как показано в [9], это условие соответствует линейному закону нарастания мощности в электромагнитном импульсе по мере его продвижения от коллекторного к катодному краю ЗС. В этом случае, если с приходом импульса к СВЧ-рефлектору заканчивается ток электронов, можно надеяться не только на оптимальный съем энергии от „рабочей“ части пучка, но и на минимальные потери энергии импульса в накачку поперечных осциллирующих частиц при несинхронном (попутном) взаимодействии. Кроме выбора надлежащего продольного распределения связи между частицами и синхронной гармоникой важную роль здесь играет также выбор оптимальной длительности тока электронного пучка и величины его фронта.

Как и в работе [3], для формирования ускоряющих импульсов напряжения с высокой частотой следования была применена гибридная схема высоковольтного модулятора, базой которой являлось зарядное устройство (драйвер) с твердотельной системой коммутации и выходным каскадом в виде индуктивного накопителя энергии и прерывателя тока на основе SOS-диодов [12]. Формируемый драйвером типа C-5H [13] стабильный импульс напряжения с фронтом около 40 ns использовался для зарядки коаксиальной формирующей линии (50 Ohm, 75 pF) до напряжения 850–900 kV (рис. 1, *a*). После коммутации двухэлектродного обостряющего разрядника (водород под давлением 50 atm.) в передающую коаксиальную линию (ПЛ) с волновым сопротивлением 75 Ohm подавался импульс напряжения длительностью ~ 7 ns и с фронтом ≤ 1 ns и (рис. 1, *b*). Импульс ускоряющего напряжения, подаваемый из ПЛ на электронный вакуумный диод ускорителя с характерным импедансом 120 Ohm, имел амплитуду импульса 500–520 kV и пиковую мощность ~ 3.5 GW. Отметим, что циркуляция газа в зазоре разрядника и охлаждение водорода не применялись. Тем не менее при коммутации ФЛ с энергозапасом 25–30 J с ростом частоты повторения до 730 Hz в пакетах длительностью 1 s снижение напряжения ускоряющего импульса не наблюдалось, а полный разброс амплитуд не превышал 5–7%.

В численном моделировании генератора методом крупных частиц (код КАРАТ, [14]) тестировалась замедляющая система с длиной в 30 периодов гофрировки со средним поперечным размером $2R \approx 1.4\lambda$,

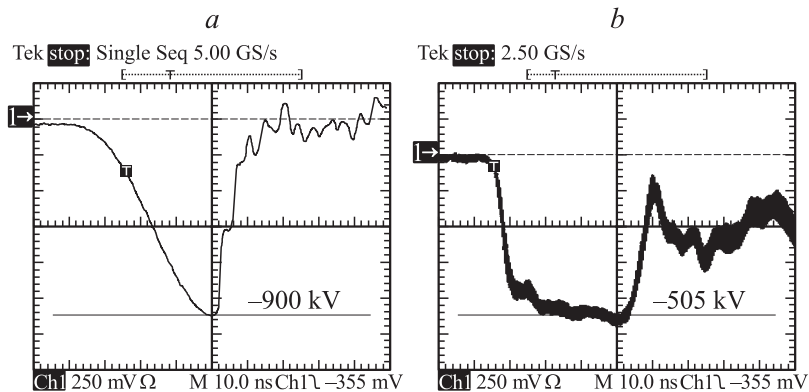


Рис. 1. *a* — осциллограмма зарядного напряжения 50-омной формирующей линии гибридного модулятора; *b* — осциллограмма сформированного импульса напряжения в передающей линии с волновым сопротивлением 75Ω , полученная в режиме накопления ENVELOP на частоте повторения 700 Hz . Регистратор — осциллограф Tek-TDS684B.

широкополосным сосредоточенным СВЧ-рефлектором и электронным инжектором, в котором форма импульса ускоряющего напряжения была максимально приближена к реальной. При оптимизации варьировались: профиль транспортирующего магнитного поля с декомпрессией электронного потока и индукция поля; импеданс вакуумного диода, распределение вдоль ЗС сопротивления связи электронного потока с синхронной гармоникой встречной волны E_{01} , а также геометрия и положение рефлектора. На рис. 2 представлены итоговые результаты численного моделирования, указывающие на возможность получения пиковой мощности излучения 2.5 GW (рис. 2, *d*) при коэффициенте конверсии мощности пучка $K \approx 0.7$ и индукции магнитного поля в ЗС $B_z \approx 0.55 \text{ T}$. В соответствии с конфигурацией на рис. 2, *b* катод располагался в области магнитного поля $B_z = 0.75 \text{ T}$. Как известно, усиленное магнитное поле благоприятствует формированию более однородного распределения взрывоэмиссионных центров на кромке катода [15]. Проходя участок декомпрессии длиной $\sim 10 \text{ cm}$, на входе в ЗС эмитируемый пучок увеличивал средний диаметр с 30 до 34 mm и затем, следуя вдоль ЗС, плавно расширялся до 36 mm . Таким образом, была

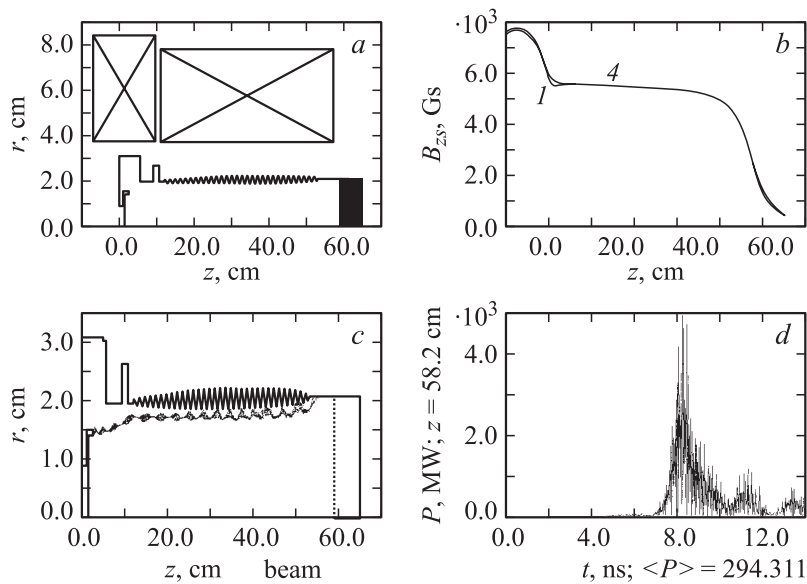


Рис. 2. Результаты численного моделирования субнаносекундной релятивистской ЛОВ: *a* — геометрия электронного инжектора, фокусирующего соленоида и замедляющей системы; *b* — распределение магнитного поля соленоида на оси системы; *c* — траектория трубчатого электронного пучка; *d* — не усредненный поток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

снижена вероятность выброса электронов на стенку в области резонансного рефлектора, где поля генерируемой волны наиболее значительны. Заметим, что при использовании в моделировании сильного магнитного поля (~ 3 Т) численный эксперимент показал значения коэффициента конверсии ≥ 1 . По-видимому, преодолеть порог конверсии мощности ~ 1 в малом магнитном поле, ограниченном значительными поперечными осцилляциями электронов в электромагнитном поле набегающего импульса, можно с дальнейшим наращиванием поперечных размеров замедляющей системы.

Геометрия электронного инжектора, соленоида и ЗС были точно воспроизведены в экспериментальной установке на основе описанного выше гибридного модулятора. В магнитоизолированном вакуумном

диоде электронного ускорителя был установлен взрывоэмиссионный трубчатый графитовый катод диаметром 30 mm с толщиной эмитирующей кромки 300 μm . В экспериментах использовался двухсекционный соленоид постоянного тока с масляным охлаждением. Питание обмоток стабилизированным током 120 А осуществлялось компактной батареей молекулярных конденсаторов с IGBT ключом. Мощность зарядного устройства и энергия конденсаторного накопителя позволяли выполнять в минуту 2–3 включения длительностью 1 s.

В ходе экспериментов энергия генерируемых СВЧ-импульсов определялась с помощью жидкостного калориметра с капиллярным измерителем, имевшим линейный участок смещения уровня жидкости в зависимости от энергии вплоть до 170 J и чувствительность 2.9 J/mm. Измерения для ряда последовательных включений СВЧ-генератора показали, что в расчете на один импульс энергия излучения составила 3.5 J с воспроизводимой точностью не хуже 3%. Таким образом, при частоте до 730 Hz в пакетах длительностью 1 s была достигнута средняя мощность СВЧ-излучения 2.5 kW.

Для определения пиковой мощности излучения в дополнение к калориметрическим измерениям применялась регистрация огибающей СВЧ-импульсов с помощью неохлаждаемого германиевого детектора на горячих носителях (ДГН) и широкополосного осциллографа. Конструкция ДГН была идентична использованной в экспериментах [4,6]. В процессе калибровочных измерений было установлено, что вплоть до частот повторения 1 kHz импульсное напряжение смещения (40 V, $3 \cdot 10^{-5}$ s) не приводит к существенному нагреву кристалла (сопротивление 120 Ohm) и дрейфу вольт-ваттной характеристики. Высокочастотный кабель RG402 и другие компоненты тракта, соединяющего ДГН и осциллограф, калибровались тестовыми прямоугольными импульсами с фронтом 90 ps с использованием стробоскопического цифрового осциллографа Tektronix TDS820 (полоса 6 GHz), формирующего одну осциллограмму за 512 последовательных отсчетов. Регистрация сигналов СВЧ-излучения в эксперименте производилась на периферии радиального распределения мощности волны E_{01} на расстоянии 5 m от излучающей антенны. Визуальный контроль этого распределения осуществлялся с помощью телекамеры и панели с газоразрядными неоновыми лампами (рис. 3). Положение детектора на краю диаграммы направленности обеспечивало возможность приема в динамическом диапазоне калибровки и позволяло свести к минимуму вероятность

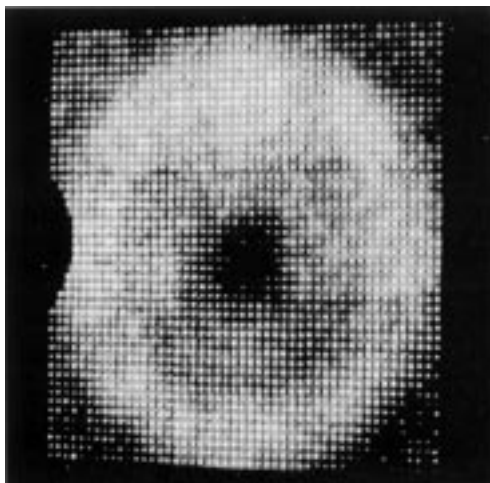


Рис. 3. Кадр видеосъемки свечения табло из газоразрядных индикаторов (150×150 см) под воздействием субнаносекундных СВЧ-импульсов диапазона 10 GHz (мода E_{01}), следовавших с частотой повторения 50 Hz.

искажений сигнала, вызванных нелинейностью детектора и внеполосной компонентой (широкополосное излучение фронта пучка и гармоники основной частоты [16,17]). Однако более серьезные трудности оказались обусловлены неидеальной отсечкой несущей частоты СВЧ-импульсов в коаксиальной части конструкции детектора и широким спектром видеоимпульса (огигающей СВЧ-сигнала). Даже малая примесь несущей частоты, в силу случайной фазы от импульса к импульсу, могла приводить к заметному эффекту „ухудшения“ стабильности амплитуды. Задача фильтрации этих помех была решена с помощью усреднения по десяти осциллограммам. Таким образом, для получения одной огигающей СВЧ-импульса в координатах „время–мощность“ (рис. 4) использовалось более пяти тысяч импульсов. Показанный на рис. 4 результат обработки усредненной осциллограммы дает длительность на полувысоте 800 ps, а с учетом полной энергии СВЧ-импульса 3.5 J, пиковую мощность излучения 2.2 GW. Использование в альтернативных расчетах пиковой мощности калибровок ДГН на частотах 9.8 и 10.1 GHz привело к отклонениям от указанной величины не более $\pm 1.5\%$, т.е.

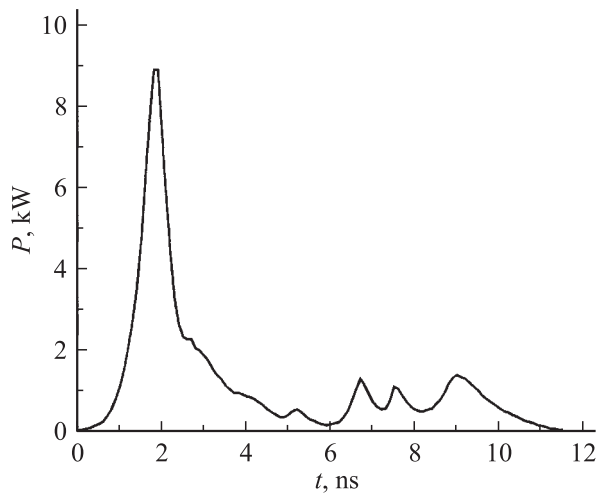


Рис. 4. Форма импульса СВЧ-излучения ЛОВ в координатах „время–мощность“, восстановленная по показаниям германиевого СВЧ-датчика и его калибровочной вольт-ваттной зависимости, полученной на частоте 10 GHz.

с учетом типичной абсолютной точности калибровочных измерений ($\sim 20\%$) измеренная пиковая мощность хорошо соответствовала результатам численного эксперимента, а конверсия мощности пучка составила не менее 0.6.

Полученные результаты вполне соответствуют сложившимся представлениям о возрастании электрической прочности изоляции при укорочении длительности импульсов (см., например, [18]). При максимальной напряженности электрических полей СВЧ-волны на апертуре излучающего рупора генератора ~ 100 kV/cm и частоте повторения 50 Hz признаки пробоя воздуха и поверхности вакуумного окна не были зафиксированы. На максимальной частоте повторения в 730 Hz было обнаружено незначительное присутствие озона, однако следы пробоя окна также отсутствовали. Следует отметить, что высокая электрическая прочность характеризует исследованный СВЧ-генератор не только с точки зрения вывода СВЧ-излучения в атмосферу, но и в более широком аспекте. Действительно, результаты эксперимента указывают на то, что подобная система не критична к целому классу явлений

(вторично-эмиссионные резонансные разряды, взрывоэмиссионные процессы и формирование плазменной нагрузки в замедляющей системе и др.), которые в СВЧ-электронике большой мощности являются причиной ограничения длительности генерируемых импульсов излучения. Например, как показывают оценки на основании степени нагрева ЗС, в эксперименте имело место существенное токооседание „отработанных“ электронов на стенки ЗС, а ее гофрированная поверхность играла роль распределенного коллектора пучка. Если в „длинноимпульсной“ релятивистской ЛОВ при этом возможен квазипериодический либо полный срыв генерации [19, 20], то в нашем случае эффекты, обусловленные плазменно-эмиссионными процессами, не наблюдаются.

Таким образом, разработан и реализован импульсно-периодический режим генерации мощных электромагнитных импульсов с несущей частотой 10 GHz на основе вынужденного излучения Черенкова в пространственно-ограниченной системе „волна–пучок“ с большим коэффициентом усиления сигнала за один проход. При частоте повторения импульсов 700 Hz в пакетах длительностью 1 s источник обеспечивает импульсную мощность более 2 GW и среднюю мощность излучения 2.5 kW. Созданный лабораторный макет может представлять интерес для различных научных и радиотехнических применений.

Авторы признательны А.И. Бушлякову, Д.М. Гришину, В.П. Губанову, А.В. Гунину, А.Н. Дядькову, А.И. Климову, О.П. Кутенкову, В.П. Тараканову и С.П. Тимошенкову за консультации, помощь в подготовке экспериментальной и измерительной техники.

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] *Elchaninov A.A., Korovin S.D., Pegel I.V. et al. // AIP Conference Proceedings of 14-th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. V. 650. Albuquerque, NM, USA. 2002. P. 279–282.*
- [5] *Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 3. С. 68–74.*

- [6] *Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Ростов В.В.* и др. // ПЖЭТФ. 2003. Т. 77. В. 6. С. 314–318.
- [7] *Гинзбург Н.С., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 9. С. 39–44.
- [8] *Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Rostov V.V.* et al. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. P. 187–196.
- [9] *Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Пегель И.В.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. XLVI. № 8, 9. С. 874–882.
- [10] *Любутин С.К., Месяц Г.А., Рукин С.Н.* и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 80–88.
- [11] *Куркан И.К., Ростов В.В., Тотъменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [12] *Рукин С.Н.* // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5–36.
- [13] *Бушляков А.И., Пономарев А.В., Рукин С.Н.* и др. // ПТЭ. 2002. № 2. С. 74–81.
- [14] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc., 1992.
- [15] *Беломятцев С.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 18. С. 1089–1092.
- [16] *Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V.* et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1997. V. 393. P. 352–355.
- [17] *Губанов В.П., Коровин С.Д., Ростов В.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 2. С. 93–96.
- [18] *Ginzburg N.S., Novozhilova N.Yu., Zotova I.V.* et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 3297–3304.
- [19] *Yalandin M.I., Shpak V.G., Tarakanov V.P.* // Digest of Technical Papers of Pulsed Power Plasma Science Conference. Las Vegas, Nevada, USA, 2001. P. 544–547.
- [20] *Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 19. С. 1168–1171.