

09;10

Генерирование мощных субнаносекундных СВЧ-импульсов диапазона 38 GHz с частотой повторения до 3.5 kHz

© Д.М. Гришин, В.П. Губанов, С.Д. Коровин, С.К. Любутин,
Г.А. Месяц, А.В. Никифоров, 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 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 15 апреля 2002 г.

Разработана и испытана релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) диапазона 38 GHz, генерирующая стабильные импульсы с длительностью ~ 250 ps и пиковой мощностью ~ 250 MW в пакетах продолжительностью до 1 s на частотах повторения 1–3.5 kHz. В ЛОВ использована неоднородная замедляющая система увеличенного поперечного сечения с полосовым рефлектором. Электронный пучок (~ 270 keV, ~ 2 kA, 0.9 ns) инжектировался сильноточным ускорителем на основе высоковольтного генератора с индуктивным накопителем энергии, полупроводниковым прерывателем тока и обостряющим водородным разрядником. Фокусирующее пучок магнитное поле с индукцией 2 T обеспечивалось охлаждаемым соленоидом, запитываемым от специального стабилизированного источника тока.

Как показали результаты эксперимента [1] и более ранних работ (см., например, [2,3]), релятивистская ЛОВ в существенно нестационарном (сверхизлучательном) режиме может обеспечивать короткие СВЧ-импульсы с длительностью порядка 10 периодов ВЧ-поля и мощностью, которая близка к мощности электронного пучка. Определенный прогресс в реализации такой возможности был связан с применением замедляющей системы (ЗС) с повышенным поперечным размером ($R \sim 0.7\lambda$), профилированием сопротивления связи вдоль длины и

резонансным рефлектором, который устанавливался вместо отрезка запредельного волновода [4]. В эксперименте [1] использовался высоко-точный электронный ускоритель РАДАН, генерировавший электронный пучок с длительностью ~ 1 ns и импульсной мощностью ~ 600 MW. Были получены СВЧ-импульсы с длительностью ~ 250 ps и пиковой мощностью до 280 MW при индукции магнитного поля $B \sim 2$ T и до 400 MW в случае $B > 5$ T. В силу высокого энергопотребления импульсного (несколько миллисекунд) соленоида был реализован режим редкоповторяющихся импульсов с паузой в десятки секунд. Вместе с тем снижение рабочего магнитного поля до уровня 2 T создало предпосылки для технической реализации импульсно-периодического режима работы СВЧ-генератора с охлаждаемым соленоидом постоянного тока. С другой стороны, к этому времени был достигнут прогресс и в технике формирования высоковольтных импульсов ускоряющего напряжения на основе гибридного модулятора, обеспечивающего частоту повторения до 3.5 kHz в пакетном режиме [5].

Описываемые в настоящей работе исследования субнаносекундной релятивистской ЛОВ диапазона 38 GHz в режиме высоких частот повторения импульсов проводились на специально созданной установке, включающей в себя следующие основные элементы:

- гибридный высоковольтный модулятор;
- вакуумный диод электронного ускорителя;
- электродинамическую систему ЛОВ и излучающую антенну;
- вакуумную систему;
- соленоид постоянного тока с индукцией 2 T и длительностью питания 1 s;
- генератор стабилизированного тока для питания соленоида;
- жидкостную систему охлаждения соленоида;
- диагностическую и измерительную аппаратуру;
- систему управления и синхронизации.

Гибридный высоковольтный модулятор состоял из наносекундного драйвера СМ-ЗНС [6] и субнаносекундного водородного обостряющего разрядника под давлением 100 ат. Драйвер СМ-ЗНС имел несколько ступеней компрессии энергии с твердотельными коммутаторами. Его выходным каскадом являлся индуктивный накопитель энергии и высоко-точный высоковольтный полупроводниковый прерыватель тока. Судя по осциллограмме импульса напряжения на 45-омном выходе гибридного

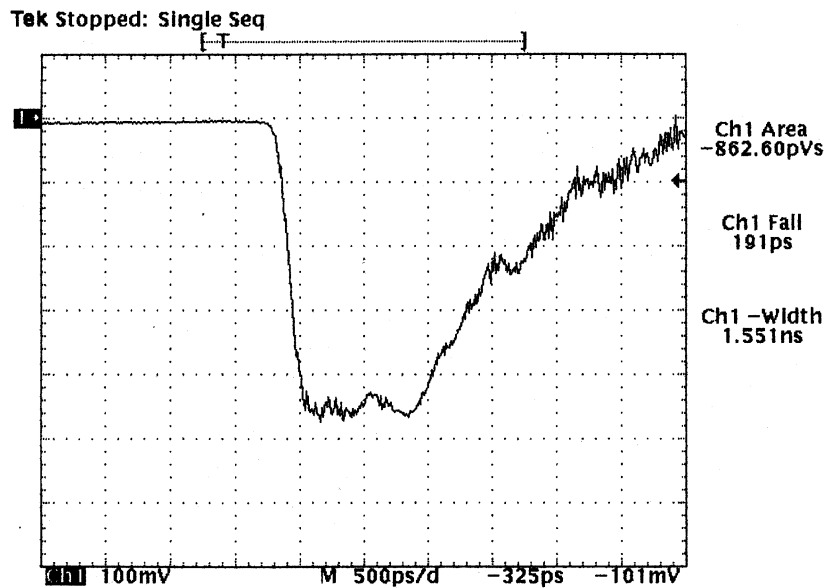


Рис. 1. Импульс напряжения с емкостного делителя на 45-омном выходе гибридного модулятора (амплитуда ~ 165 kV; длительность „полки“ ~ 0.9 ns), регистрируемый на частоте повторения 1 kHz цифровым стробоскопическим осциллографом.

модулятора (рис. 1), полный амплитудный разброс ускоряющих импульсов не превышал 3–5% при частотах повторения вплоть до 3.5 kHz. Высоковольтный импульс (рис. 1) передавался к катоду ускорителя по ступенчатой коаксиальной линии с суммарным коэффициентом трансформации 1.6. При этом на катоде достигалась амплитуда напряжения ~ 260 –270 kV. Трубочатый графитовый катод с диаметром 8.6 mm и толщиной кромки 0.1 mm размещался в анодной трубе диаметром 19 mm. Обмотка соленоида сопротивлением 0.7Ω была выполнена в виде секций, намотанных из медной шины 1×5 mm. Каждый виток охлаждался трансформаторным маслом, прокачиваемым через радиальные каналы между секциями. Индукции поля 2 T соответствовал ток в обмотке 265 A. Батарея молекулярных конденсаторов общей

емкостью 4.6 F коммутировалась на соленоид в режиме неполного разряда с помощью транзисторного ключа с обратной связью путем широтно-импульсной модуляции, обеспечивавшей стабилизацию тока 2% в течение 1 s. Рассеиваемая в обмотке соленоида энергия отводилась с помощью масляной прокачки в течение паузы между импульсами (~ 100 s), необходимой для подзаряда батареи.

Изготовленная из меди методом гальванопластики ЗС включала в себя 18 периодов гофрировки со средним диаметром 11.2 mm (как и в [1]). Рабочая мода генератора — E_{01} . Рупорная антенна имела выходное вакуумное окно диаметром 50 mm. Откачка вакуумной камеры ЛОВ до 10^{-3} – 10^{-4} Torr производилась турбомолекулярным насосом со стороны вакуумного диода ускорителя и одновременно через щель вблизи вакуумного окна.

Результаты полномасштабного численного моделирования методом крупных частиц (код КАРАТ [7]) показали, что в субнаносекундном СВЧ-импульсе может содержаться энергия до 100 mJ (рис. 2). Пакетный режим облегчает возможность calorиметрических измерений. Поэтому специально разработанный calorиметр со спиртовым СВЧ-поглотителем и капиллярным измерителем калибровался в расчете на регистрацию суммарной энергии пакета из 500–1000 импульсов за время ≤ 1 s. Калибровка calorиметра в диапазоне 10–100 J выполнялась в двух режимах. В первом использовался разряд конденсатора с постоянной времени 20 ms на тонкую нихромовую проволоку, расположенную в объеме поглотителя. Во втором применялся источник постоянного тока, включаемый с помощью реле времени на интервалы 0.5–1.5 s. Оба режима дали совпадение результатов калибровки не хуже 3% и продемонстрировали линейность показаний капиллярного измерителя от вкладываемой энергии.

Сигнал с германиевого СВЧ-детектора на горячих носителях регистрировался цифровым стробоскопическим осциллографом Tektronix-TDS820 с аналоговой полосой 6 GHz. Для получения одной осциллограммы требовалось последовательное накопление не менее 512 импульсов (отсчетов с дискретизацией в 10 ps). Важно, что в данном случае не было необходимости применять дополнительную кабельную линию задержки, обычно существенно искажающую форму субнаносекундного сигнала. Длина калиброванного кабельного тракта между детектором и осциллографом составляла 1.5 m. Калибровка детектора осуществлялась в диапазоне (0.1–50) kW с помощью магнетронного

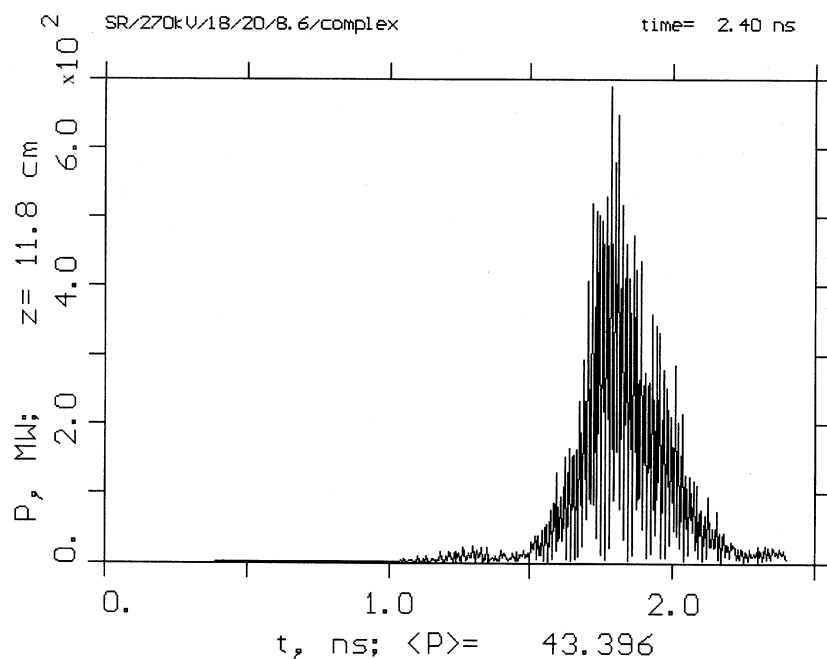


Рис. 2. Результаты численного моделирования субнаносекундной релятивистской ЛОВ диапазона 38 GHz с транспортирующим магнитным полем 2Т: усредненный поток мощности СВЧ-импульса. Фронт 200 ps; длительность на полувысоте ~ 250 ps; энергия — 104 мДж за импульс.

генератора и термисторного моста М3-22А. При этом из-за высокой частоты повторения импульсное напряжение смещения минимизировалось по амплитуде и длительности с учетом возможного нагрева кристалла и температурного дрейфа чувствительности в процессе одного цикла измерения. Незначительный дрейф действительно имел место: при $F \leq 1$ kHz к концу пакета чувствительность падала приблизительно на 2%, в то время как при $F = 3.5$ kHz — на 7%. Из-за нелинейности вольт-ваттной характеристики детектора получаемые в эксперименте осциллограммы подвергались компьютерной обработке для вычисления эффективной длительности СВЧ-импульсов.

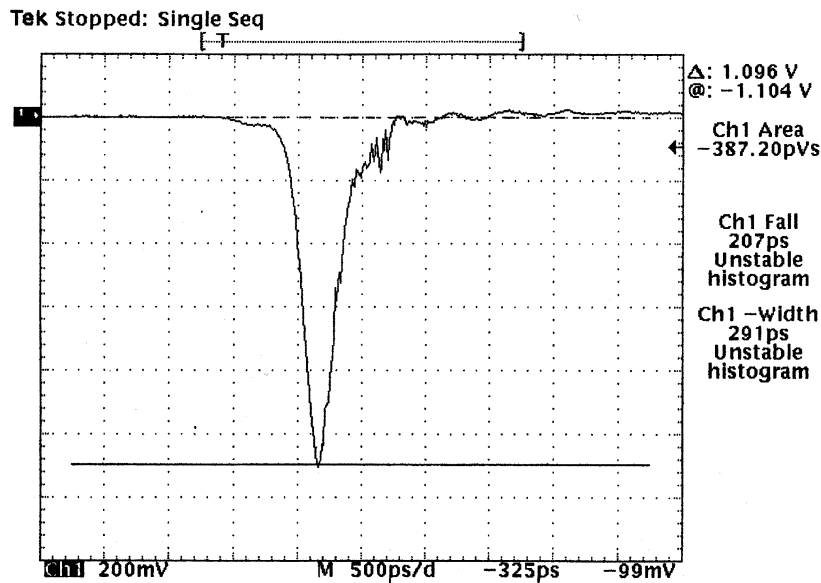


Рис. 3. Типичный сигнал СВЧ-детектора, регистрируемый стробоскопическим осциллографом по накоплению за 512 отсчетов. Фронт 207 ps, длительность на полувысоте \sim 291 ps.

В процессе измерений поляризации излучения соответствовала волне E_{01} . Детектор располагался в точке $L = 4$ м; $R = 0.9$ м (L — расстояние по оси от вакуумного окна; R — радиальное положение). В соответствии с предварительными измерениями эффективное сечение рупорной антенны с точностью $\pm 2\%$ не имело зависимости от частоты СВЧ в 15% полосе. Чтобы устранить искажения сигнала в приемнике, связанные с отражениями от нагрузки, использовалась развязка по времени в виде длинного волновода между германиевым кристаллом и поглощающей нагрузкой.

Типичная осциллограмма сигнала СВЧ-детектора, регистрируемая осциллографом за 512 последовательных отсчетов, представлена на рис. 3. Осциллограмма была получена на частоте повторения 1 кГц. Обработка показала, что реальные длительности фронта и СВЧ-

импульса на полувысоте составляют 190 и 250 ps соответственно. Измерения калориметром в тех же условиях дали значение энергии 65 mJ за импульс, что соответствует пиковой СВЧ-мощности 260 MW. Средняя мощность СВЧ-излучения в пакете составляла около 200 W при частоте следования 3.5 kHz. Значения пиковой мощности были близки к результатам, полученным в режиме одиночных импульсов [1].

Следует отметить предпосылки некоторого занижения измеряемой пиковой мощности. Так, очевидными являются ограничения в частотной характеристике системы регистрации „детектор–передающий тракт–осциллограф“. Как показали численные расчеты СВЧ-генератора, пиковая часть формируемого импульса, где мощность составляет более 250 MW, должна иметь длительность всего несколько периодов ВЧ-колебаний, т.е. около 50–70 ps (рис. 2). Однако переходная характеристика осциллографа TDS820 составляла 67 ps. Аналогичную роль играла и паразитная емкость кристалла детектора на корпус волновода, поскольку рефлектометрические измерения указывали на затягивание фронта тестового сигнала (100 ps) до 150 ps. С другой стороны, точность калибровки датчиков тока пучка и ускоряющего напряжения составляла около 10%, т.е. параметры электронного пучка могли несколько отличаться от планируемых. Тем не менее получена неплохая корреляция результатов эксперимента и расчета.

В одной из серий импульсов было осуществлено преднамеренное увеличение ускоряющего напряжения на 4–5% до предельно возможного значения, которое позволял модулятор. Это привело к росту энергии излучения до 80 mJ за импульс. Таким образом, максимальная пиковая мощность генерируемых СВЧ-импульсов превышала 300 MW.

В эксперименте было замечено снижение мощности и длительности СВЧ-пиков, а также ухудшение их стабильности при наработке катода порядка 10^4 импульсов и более. В последующем предполагается проверить гипотезу о возрастании времени задержки при формировании тока пучка взрывоэмиссионным катодом. Подобная закономерность уже наблюдалась ранее в наносекундном диапазоне длительностей импульсов напряжения, а причина этого эффекта связывалась с ухудшением и последующей стабилизацией эмиссионной способности катода [8]. Если это единственный существенный эффект, влияющий на ресурсные характеристики созданного СВЧ-генератора, то его можно преодолеть, например, увеличением длительности импульса ускоряющего напряжения.

Таким образом, проведенный цикл экспериментов, начатых еще в режиме одиночных импульсов [1], подтвердил расчетные предпосылки повышения коэффициента конверсии в сверхизлучательном пике релятивистской ЛОВ за счет выбора неоднородной замедляющей системы с повышенной полосой пропускания и соответственно ослабленным эффектом распыливания волнового пакета. Впервые продемонстрирована возможность генерирования мощных субнаносекундных СВЧ-импульсов с высокой частотой повторения.

Авторы признательны Н.С. Гинзбургу за внимание и интерес к работе; И.В. Пегелю, А.И. Климову и В.П. Тарakanову за полезные консультации; О.П. Кутенкову, А.В. Гунину, А.С. Степченко за помощь в создании экспериментальной установки.

Список литературы

- [1] *Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В.* и др. // ПЖТФ. 2002. Т. 28. № 2. С. 81–89.
- [2] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037–1052.
- [3] *Yalandin M.I., Shpak V.G., Shunailov S.A.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2000. V. 28. N 5. P. 1615–1619.
- [4] *Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [5] *Любутин С.К., Месяц Г.А., Рукин С.Н.* и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 80–88.
- [6] *Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г.* и др. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 52–60.
- [7] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc. 1992.
- [8] *Gunin A.V., Landl V.F., Korovin S.D.* et al. // IEEE Transaction of Plasma Science. 2000. V. 28. N 3. P. 537–541.