

09;10

Экспериментальное исследование переходного процесса в импульсной релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона

© М.И. Яландин, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 14 июля 1998 г.

В окончательной редакции 14 января 1999 г.

Экспериментально исследовано влияние крутизны фронта токового импульса наносекундного сильноточного электронного пучка на режим автоколебаний, устанавливающийся в релятивистской лампе обратной волны диапазона 38 GHz. Показано, что уже на временах ~ 300 ps достигим уровень пиковой мощности более 50 MW.

Характер переходного процесса в релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) зависит от превышения рабочего тока генератора над стартовым и от уровня мощности начального СВЧ-сигнала в полосе синхронизма прибора. Такой сигнал представляет спектральную составляющую излучения фронта плотного электронного пучка, инжектируемого в замедляющую систему [1]. В настоящее время повышенный интерес к исследованию тонкой структуры переходного процесса вызван тем обстоятельством, что, согласно [1,2], релятивистская ЛОВ уже на временах порядка $t \sim L/v_g$ может генерировать короткий всплеск СВЧ-излучения с уровнем мощности ббльшим, чем в стационарном режиме. Здесь L — длина замедляющей системы; v_g — групповая скорость волны в пространстве взаимодействия. Для ЛОВ диапазона частот 38 GHz при энергии пучка ~ 200 keV характерное значение (L/v_g) находится в области сотен пикосекунд. Экспериментальное исследование процесса установления режима генерации в таком приборе [3] стало возможным после создания сильноточного электронного ускорителя [4] (~ 250 keV, ~ 2 kA, 5 ns) со стабильными характеристиками и плавно регулируемой крутизной фронта импульса ускоряющего напряжения (0.3–1.5 ns). С этой же целью были разработаны германиевый СВЧ-детектор на горячих

носителях и датчик тока пучка с разрешением по времени 150 и 200 ps соответственно.

Замедляющие системы ЛОВ представляли собой круглые волноводы с синусоидальной гофрировкой стенки. С одной стороны замедляющей системы размещался электронный вакуумный диод с холодным катодом, с другой — коллектор пучка и выходная рупорная антенна. Вакуумный диод отделялся от замедляющей системы круглым запердельным волноводом. Трубочатый пучок диаметром 5.5 mm с толщиной стенки 0.4 mm удерживался аксиальным магнитным полем импульсного соленоида с индукцией 5Т. Синхронной пучку являлась первая обратная пространственная гармоника волны E_{01} . В численных расчетах и эксперименте было показано [5], что при субнаносекундной длительности фронта ускоряющего напряжения на входе дрейфовой камеры (замедляющей системы), удаленной от взрывоэмиссионного катода на 1.5–2 см, формируется продольный кроссовер. Фронт импульса тока электронного сгустка в этой области оказывается короче фронта ускоряющего напряжения. Это происходит из-за динамической группировки электронов, стартующих с катода при нарастающем во времени напряжении. Дополнительное обострение наносекундного фронта ускоряющего напряжения должно существенно увеличить уровень начального СВЧ-сигнала в полосе синхронизма ЛОВ. Осуществление подобного режима и было основной целью поставленных экспериментов.

На рис. 1, *a* показан характер изменения формы фронта импульса ускоряющего напряжения. При изменении зазора обостряющего азотного разрядника высокого давления (50 at), установленного на выходе 5-ns высоковольтного модулятора ускорителя. Соответствующее изменение формы сигнала СВЧ-детектора, регистрирующего излучение ЛОВ, представлено на рис. 1, *b, c*. Серия осциллограмм на рис. 1, *c* получена при 1.7-кратном увеличении длины замедляющей системы по отношению к рис. 1, *b*. Таким образом, эти два варианта ЛОВ различались приблизительно в 5 раз по стартовому току ($I_{st} \sim L^{-3}$). При этом для короткой замедляющей системы (рис. 1, *b*) $I_{st1} \approx 0.4$ кА, а рабочий ток пучка в экспериментах (рис. 1, *b, c*) был одинаковым $I_{op} \approx 1.6$ кА. Из рис. 1, *b-I* видно, что уже при 4-кратном превышении рабочего тока над стартовым наблюдается небольшая модуляция СВЧ-сигнала даже без дополнительного обострения фронта тока пучка. Обострение усиливает модуляцию (рис. 1, *b-III*), а в случае длинной замедляющей системы ($I_{op}/I_{st2} \approx 20$) импульс тока пучка с резким фронтом приводит к явно

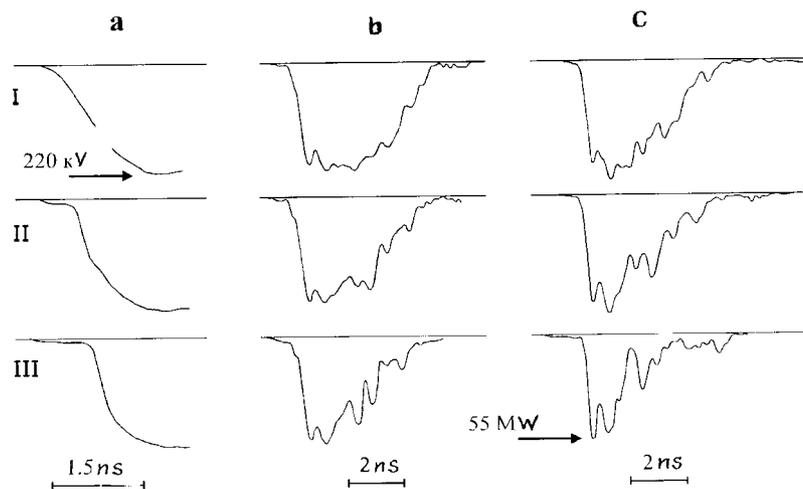


Рис. 1. Вариация формы импульса СВЧ-излучения ЛОВ с замедляющими системами длиной 60 и 100 мм (*b* и *c* соответственно) при последовательном обострении фронта импульса ускоряющего напряжения, подаваемого на катод (*a*).

выраженному стохастическому режиму генерации с близкой к 100%-ной глубинной модуляции мощности (рис. 1, *c*-III). В последнем случае обращает на себя внимание уменьшение длительности генерации. Следует отметить, что форма СВЧ-импульсов на рис. 1 хорошо воспроизводилась от импульса к импульсу.

При регистрации амплитудных и временных характеристик импульсов СВЧ-излучения с субнаносекундным разрешением результаты измерений потребовалось корректировать из-за ограничения полосы пропускания регистрирующей системы. Использованный в экспериментах осциллограф С7-19 имеет достаточную полосу пропускания (5 GHz), поэтому основные проблемы были связаны с использованными линией задержки и соединительными кабелями. Эти элементы калибровались тестовым импульсом длительностью 3.5 ns и фронтом 70 ps (рис. 2), который регистрировался цифровым стробоскопическим осциллографом "Тектроникс" TDS820 с полосой 6 GHz. Для калибровки использовались

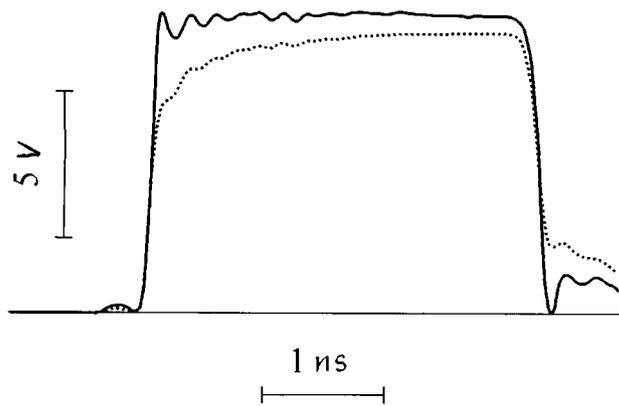


Рис. 2. Искажение 3.5-ns калибровочного импульса с фронтом 70 ps (сплошная линия) после прохождения 50-ns кабельной линии задержки (пунктирная линия).

и более короткие импульсы с длительностью на полувисоте от 190 до 550 ps и фронтами 90–300 ps. Анализ осциллограмм, полученных в результате эксперимента, и данных калибровки тракта показал, что фронты импульсов СВЧ-излучения изменялись от 500 ps (рис. 1, *b-I*) до 200 ps (рис. 1, *c-III*). Для обоих вариантов замедляющих систем наблюдалось увеличение скорости роста СВЧ-мощности при обострении фронта пучка ($I \rightarrow II \rightarrow III$). Максимальное полученное значение составило 300 MW/ns (рис. 1, *c-III*). Учет импульсной характеристики регистрирующего тракта (рис. 2) показывает, например, что амплитуда первого всплеска СВЧ-мощности (рис. 1, *c-III*) не менее чем на 10% превосходит амплитуду последующего пика. Кроме того, ограничение частотной характеристики приводит к некоторому сглаживанию картины модуляции СВЧ-сигнала и уширению пиков на 10–15% при длительностях 500–300 ps. С учетом необходимых амплитудных поправок мощность первого субнаносекундного пика в этих условиях может быть оценена в 50–55 MW.

Вопрос о возможном влиянии отражений от коллекторного конца замедляющей системы на нерегулярность СВЧ-сигналов при временах $t \geq L/v_g$ изучался в специальной серии измерений. Для этого использовалась процедура укорочения предварительно обостренного 5-ns им-

пульса ускоряющего напряжения (рис. 1, *a*-III) с помощью срезающего разрядника до значения ~ 1 ns. В этом случае длительности токового импульса пучка было достаточно для генерирования только первого пика СВЧ-излучения длительности 300–500 ps при той же мощности. Если гофрировка замедляющей системы обрывалась резко, то короткий микроволновый импульс порождает последовательность отражений с фиксированной задержкой $2L/v_g$ [6]. В настоящих экспериментах использовались замедляющие системы, в которых амплитуда четырех последних периодов гофрировки постепенно уменьшалась. В результате гофрированный волновод плавно переходил в круглый выходной, уровень отражений составлял менее 5% и они вносили несущественные искажения в регистрировавшиеся осциллограммы.

Таким образом, в данной работе экспериментально подтверждено важное значение параметра dI/dt фронта токового импульса сильноточного пучка для вариации режима автоколебаний ЛОВ миллиметрового диапазона и достижения пиковых мощностей в десятки мегаватт в пикосекундном диапазоне. В связи с этим представляется перспективной высказанная в [7] идея реализации генератора с еще более высоким темпом нарастания СВЧ-мощности за счет применения ускоряющего импульса напряжения, синтезированного по принципу "короткий всплеск на фронте с последующим квазиплоским участком".

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 98–02–17308.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 137–1052.
- [2] Гинзбург Н.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 9. С. 39–44.
- [3] Быков Н.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 9. С. 541–545.
- [4] Shpak V.G. et al. // Proc. BEAMS'96 — 11 th Int. Conference of High Power Particle Beams. Prague, Czech Republic. 1996. P. 913–916.
- [5] Шпак В.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 7. С. 65–69.
- [6] Ginzburg N.S. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1997. V. 393. P. 352–355.
- [7] Shpak V.G. et al. // Proc. of the 11 th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, ML, USA. 1997. P. 1581–1585.