

02;10;12

Импульсно-периодический источник мощного когерентного электромагнитного излучения 8-см диапазона с наносекундной длительностью импульсов

© К.В. Афанасьев, Н.М. Быков, В.П. Губанов, А.А. Ельчанинов,
А.И. Климов, С.Д. Коровин, В.В. Ростов, А.С. Степченко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: contact@hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 13 марта 2006 г.

Рассчитан и экспериментально исследован так называемый „сверхизлучательный“ режим генерации коротких электромагнитных импульсов, возбуждаемых в протяженной замедляющей системе релятивистской лампы обратной волны с несущей частотой 3.7 GHz. В условиях пониженного магнитного поля, составлявшего около 0.2 T в замедляющей системе, достигнута импульсная микроволновая мощность до 800 MW с длительностью импульсов 2.5 ns. При частоте повторения импульсов 100 Hz длительность непрерывной работы ограничена временем жизни взрывоземиссионного катода порядка 10^6 импульсов. Впервые зафиксирована возможность синхронизации фазы высокочастотного поля релятивистского СВЧ-генератора по отношению к фронту импульса напряжения.

PACS: 84.40.Ik

На протяжении последних нескольких лет теоретически и экспериментально изучена [1–4] возможность получения мощных СВЧ-импульсов в нестационарном режиме работы черенковского автогенератора — релятивистской лампы обратной волны. Примечательно, что длительность микроволнового импульса обратно пропорциональна инкременту абсолютной неустойчивости в системе „пучок–встречная волна“ [1] и для типичных параметров сильноточных пучков с токами, значительно превышающими стартовый ток генератора, может составлять величину порядка 10 периодов высокочастотного поля.

При этом в случае сильно замагниченного электронного потока легко реализуется ситуация, когда пространственная протяженность импульса достаточно мала по сравнению с длиной замедляющей системы и пиковая электромагнитная мощность на выходе превосходит мощность электронного потока [2,3]. Высокая конверсия мощности реализуется с помощью весьма сильных магнитных полей и, как правило, в режиме однократных импульсов. Применение термина „сверхизлучение“ для указанного процесса вполне оправдано, по мнению авторов, так как времена релаксации когерентности в электронном потоке и в волне велики по сравнению с длительностью импульса. С другой стороны, если длительность токового импульса не слишком велика (меньше суммы времен прохождения электроном и волной всей длины прибора), мощность в СВЧ-импульсе пропорциональна квадрату числа частиц (или заряда) в электронном пучке.

Разработка подобных импульсно-периодических источников актуальна для решения некоторых прикладных задач (тестирование электроники, биомедицинские исследования). Для практических применений более целесообразно использовать в составе микроволнового источника соленоиды с относительно слабым магнитным полем, охлаждаемые теплоносителем в условиях комнатной температуры. Выбор режима по магнитному полю приводит к значению, которое составляет приблизительно половину от величины H_r , соответствующей резонансному циклотронному поглощению встречной волны при условии

$$\frac{eH_r}{mc\gamma} = \omega + hV_{\parallel}.$$

Здесь e , m и V_{\parallel} — заряд, масса и продольная скорость электрона, c — скорость света в вакууме, γ — релятивистский фактор, ω — круговая частота волны, h — ее продольное волновое число. Для таких условий, как показали первые эксперименты, генерируемая в режиме сверхизлучения микроволновая мощность оказалась в 2–3 раза ниже, чем в сильных магнитных полях, а длительность импульса примерно в 1.5 раза выше. Этот результат, вероятно, можно объяснить тем, что из-за наличия поперечных скоростей уже при формировании электронного пучка у него имеется разброс продольных скоростей, который существенно сокращает время релаксации когерентности в потоке.

В условиях пониженного магнитного поля усиливается эффект, связанный с процессом формирования конечного числа центров на кромке трубчатого катода и явлением экранирования поверхности кромки полями пространственного заряда, что приводит к росту азимутальной неоднородности электронного пучка. Для периодических режимов работы (ранее реализовывались при частоте повторения импульсов до 3.5 kHz [4]) характерна также проблема сокращения ресурса работы, связанная с полировкой поверхности взрывоэмиссионного катода.

В настоящей работе исследовалась генерация коротких импульсов СВЧ-излучения с несущей частотой $f_0 = 3.7 \text{ GHz}$ в режиме сверхизлучения. Кроме того, исследовалась возможность наращивания ресурса работы катода в длительном импульсно-периодическом режиме с учетом того, что стабилизация работы катода обуславливает стабильность параметров генерируемых СВЧ-импульсов. С этой целью магнитное поле в районе катода было усилено более чем в 2 раза по сравнению с полем в замедляющей системе. При диаметре электронного пучка в замедляющей системе около 95 mm диаметр катода составлял 60 mm. Известно [5], что декомпрессия пучка способствует уменьшению поперечных скоростей электронов, что делает пучок более моноэнергетичным и приводит к повышению выходной мощности генератора.

Для улучшения эмиссионных условий было предложено использовать импульс напряжения специальной формы, с крутым передним фронтом и выбросом в начале (рис. 1).

В качестве источника импульса напряжения использовался генератор типа СИНУС с параметрами: диаметр коаксиальной формирующей линии 350 mm, волновое сопротивление 36 Ω , зарядное напряжение 650 kV, длительность выходного импульса 13 ns. Коммутация осуществлялась неуправляемым азотным разрядником с продувкой межэлектродного промежутка. Для коррекции формы высоковольтного импульса использовалась цепь из „буферной“ передающей линии с электрической длиной 0.5 ns и волновым сопротивлением 15 Ω и обостряющего разрядника. Часть фронта высоковольтного импульса, отраженная от обостряющего разрядника, в дальнейшем, после пробоя обострителя, складываясь с основной частью импульса, приводила к увеличению амплитуды его начального участка до 30%. Время задержки срабатывания обострителя можно было менять, регулируя давление и межэлектродный зазор, что позволяло изменять амплитуду пика.

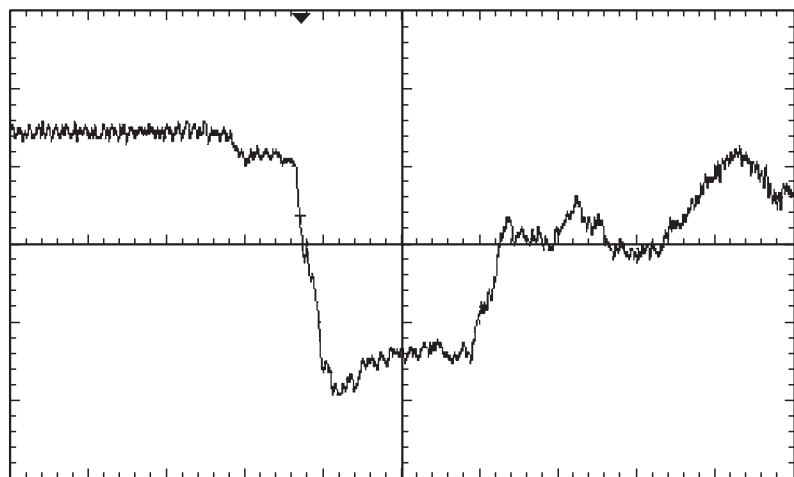


Рис. 1. Импульс напряжения высоковольтного генератора. Масштаб 5 ns/div.

Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией с импедансом около 100Ω . Напряжение на катоде составляло 460 kV. Катод изготавливался из фольгированного стеклотекстолита. Для транспортировки пучка использовался соленоид из двух секций: катодной и секции дрейфа с внутренним диаметром 150 mm, длиной 370 и 920 mm соответственно. Соленоид питался от широтно-импульсного модулятора с возможностью независимой регулировки тока в секциях. Охлаждение соленоида осуществлялось проточным маслом, выделяемая мощность составляла до 12 kW, общая масса соленоида 450 kg. Замедляющая система состояла из 26 гофр со средним диаметром 110 mm и периодом гофрировки 36 mm. Амплитуда гофрировки возрастала от катодного конца к коллекторному.

Для регистрации выходного сигнала СВЧ-генератора использовались волноводно-полосковый направленный ответвитель и антенна в виде короткого электрического вибратора. Суммарное ослабление в тракте ответвителя достигало 108 dB. СВЧ-сигнал регистрировался цифровым осциллографом TDS7704B с аналоговой полосой 4 GHz как непосредственно, так и с использованием детектора на полупроводниковом диоде. На рис. 2 приведена осциллограмма, полученная наложением

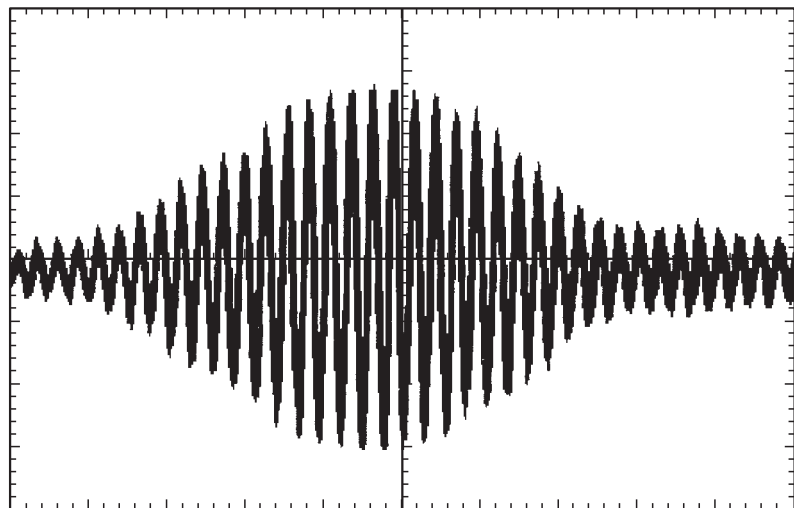


Рис. 2. Оциллограмма, полученная наложением 30 последовательных СВЧ-импульсов. Шкала 1 ns/div.

30 последовательных СВЧ-импульсов. Запуск осциллографа происходил от фронта импульса напряжения в передающей линии (рис. 1). Непосредственная регистрация радиоимпульса позволила обнаружить эффект синхронизации фазы высокочастотных колебаний с фронтом импульса питающего напряжения. Этот результат может быть объяснен тем, что возбуждение генерации происходит за счет гармоник короткого фронта тока электронного пучка [6]. Фиксация фазы колебаний с помощью крутого фронта импульса напряжения наблюдалась ранее в генераторе на диоде Ганна [7].

Энергия излучения, измеренная при помощи вакуумного калориметра, составляла до 2 J/pulse. Пиковая мощность СВЧ-излучения достигала 800 MW, ее нестабильность, не превышавшая 5%, была обусловлена преимущественно нестабильностью выходного напряжения высоковольтного генератора.

Изменение соотношений токов в катодной и дрейфовой секциях соленоида давало возможность изменять диаметр электронного пучка в замедляющей системе лампы без замены катода. Увеличение тока

в дрейфовой секции приводило к уменьшению диаметра пучка и сопротивления связи с рабочей гармоникой волны. Соответственно уменьшался и инкремент неустойчивости. При увеличении тока секции дрейфа на 10% длительность СВЧ-импульса возрастала с 2.2 до 2.8 ns.

Центральная частота излучения составляла 3.7 GHz, ширина спектра — около 400 MHz на уровне — 10 dB. Частота повторения импульсов 100 Hz. Ресурс работы катода до замены около 10^6 импульсов.

Таким образом, в данной работе удалось реализовать источник периодически следующих СВЧ-импульсов на частоте 3.7 GHz с пиковой мощностью до 800 MW на основе релятивистской лампы обратной волны, работающей в режиме сверхизлучения с фиксацией начальной фазы электромагнитных колебаний с помощью крутого фронта импульса напряжения на диоде, формирующем трубчатый электронный пучок при магнитных полях ниже уровня циклотронного поглощения электромагнитной волны.

Работа выполнена при поддержке грантов 05-02-08028 офи_а, 04-02-08029 офи_а.

Список литературы

- [1] *Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Ростов В.В.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. № 6. С. 314–318.
- [2] *Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Mesyats G.A.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. N 3. P. 1093–1099.
- [3] *Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Пегель И.В., Ростов В.В., Яландин М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8–9. С. 1–9.
- [4] *Коровин С.Д., Любутин С.К., Литвинов Е.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 11. С. 88–94.
- [5] *Куркан И.К., Ростов В.В., Тотъменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [6] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037–1052.
- [7] *Введенский Ю.В., Андриянов А.В., Ермилов Э.А.* // ПТЭ. 1975. № 1. С. 114–115.