

09;10;12

## Релятивистская ЛОВ с перестройкой частоты напряжением

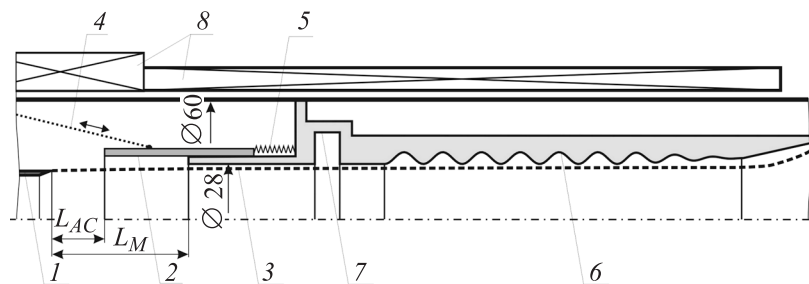
© А.М. Бечаснов, В.Л. Братман, Н.Г. Колганов,  
С.В. Мишакин, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород  
E-mail: mishakin2006@rambler.ru

Поступило в Редакцию 25 августа 2009 г.

Разработан генератор 10-GHz диапазона с перестройкой частоты излучения около 5% при изменении ускоряющего напряжения от 600 до 350 kV. Дискретное изменение напряжения и перестройка частоты от импульса к импульсу осуществлялись оперативно (без развакуумирования рабочего объема) изменением расстояния между анодом и катодом вакуумного диода; при этом мощность электронного пучка была почти постоянной, а мощность СВЧ-излучения менялась в пределах 0.4–0.8 GW. Введением в ускоряющий промежуток диэлектрического цилиндра удалось добиться плавного падения напряжения от 600 до 350 kV и соответствующей перестройки частоты в течение импульса длительностью около 20 ns.

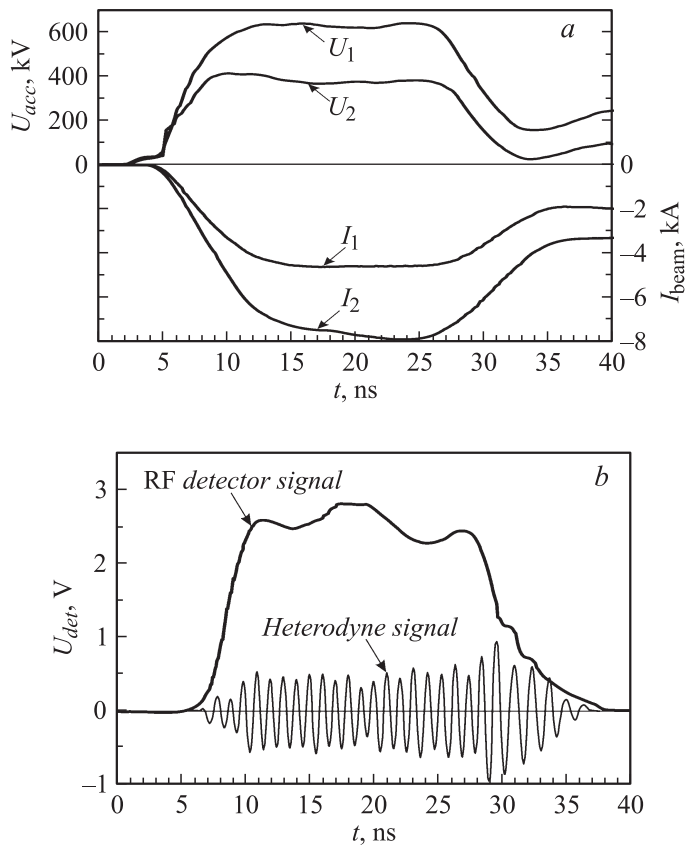
В рамках работ по пассивной компрессии мощных СВЧ-импульсов в Институте прикладной физики РАН исследуются методы перестройки частоты и частотной модуляции при наносекундных длительностях [1,2]. Соответствующие эксперименты ведутся, в частности, на ускорителе „СИНУС-6“, позволяющем формировать импульсы напряжения величиной до 600 kV при токе до 6 kA и длительности около 20 ns. В качестве СВЧ-источника используется наиболее простой и отработанный генератор — релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) на моде  $TM_{0,1}$  [3,4]. ЛОВ наименее инерционна и наиболее адаптивна при изменении энергии частиц, которое при умеренно релятивистских значениях сопровождается заметным изменением частоты генерации. В исследуемой ЛОВ (рис. 1) для повышения КПД генерации используется резонансный отражатель 7 [5], причем его параметры и параметры замедляющей структуры 6 оптимизированы таким образом, чтобы изменением ускоряющего напряжения обеспечить наиболее ши-



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — катод; 2 — подвижный анодный цилиндр; 3 — электронный пучок; 4 — нить для перемещения подвижного цилиндра; 5 — пружина; 6 — замедляющая структура ЛОВ; 7 — резонансный отражатель; 8 — катушки магнитной системы.

рокополосную и плавную перестройку частоты излучения, сохраняя при этом КПД на достаточно высоком уровне 20–30% [2]. Согласно расчетам с использованием компьютерного кода KARAT [6], в сильном продольном ведущем магнитном поле, превышающем 2Т, при уменьшении напряжения с 600 до 350 кВ и тока пучка от 6.5 до 4 кА, частота генерации разработанной ЛОВ должна уменьшаться с 10.1 до 9.6 GHz, а КПД должен поддерживаться на уровне 20–25%. Для оперативного изменения диаметра пучка и связи электронов с рабочей волной магнитная система генератора 8 кроме основного импульсного соленоида включает дополнительную катушку, позволяющую независимо изменять магнитное поле в области катода. Электронный пучок получается в результате взрывной эмиссии частиц с кромки магнитоизолированного катода 1 диаметром 24 мм. Ток и напряжение пучка существенно зависят от геометрии анод-катодного промежутка, которая в исследуемой конструкции может механически изменяться от импульса к импульсу.

Напряжение, приложенное к катоду (рис. 2, *a, c*), измерялось с помощью емкостного делителя, а ток пучка на входе генератора (рис. 2, *a, c*) измерялся в отдельных экспериментах с помощью торцевого шунта. Форма СВЧ-импульса регистрировалась детектором на горячих носителях (рис. 2, *b, d*), а зависимость выходной мощности от



**Рис. 2.** Результаты экспериментов с релятивистской ЛОВ при различных конфигурациях диода, формирующего электронный пучок: *a* — ускоряющее напряжение и ток пучка, соответствующие длинам  $L_{AC} = 48$  mm ( $U_1, I_1$ ) и  $L_{AC} = 10$  mm ( $U_2, I_2$ ), в случае металлического анодного цилиндра; *b* — сигналы с СВЧ детектора и гетеродина (частота задающего генератора 9.11 GHz) для случая  $L_{AC} = 48$  mm и металлического анодного цилиндра; *c* — ускоряющее напряжение и ток пучка; соответствующие конфигурации с  $L_{AC} = 14$  mm и  $L_M = 48$  mm в случае цилиндра из оргстекла; *d* — соответствующие сигналы с СВЧ детектора и гетеродина, а также зависимость мгновенной частоты генерации от времени; *e* — спектры выходного излучения ЛОВ для импульсов *d* (сплошная линия) и *b* (пунктирная линия).

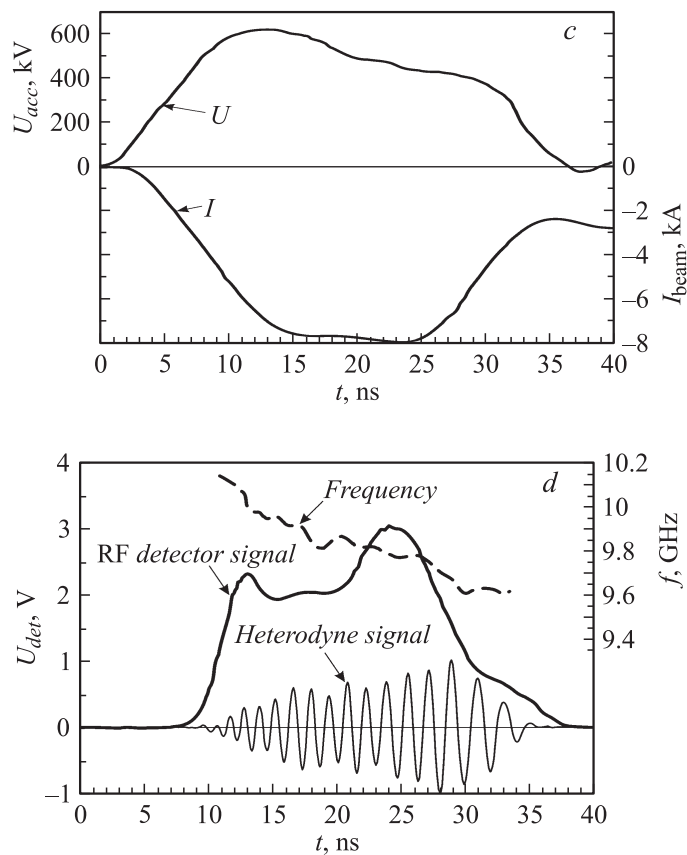


Рис. 2 (продолжение).

времени восстанавливалась с учетом калибровки детектора и измеренной калориметром полной энергии в импульсе. Для анализа СВЧ-спектра использовалось гетеродинирование, при котором в детекторе на горячих носителях для получения сигнала промежуточной частоты (рис. 2, *b, d*) смешивалась часть излучения ЛОВ с излучением импульсного магнетрона с фиксированной частотой и мощностью несколько десятков киловатт.

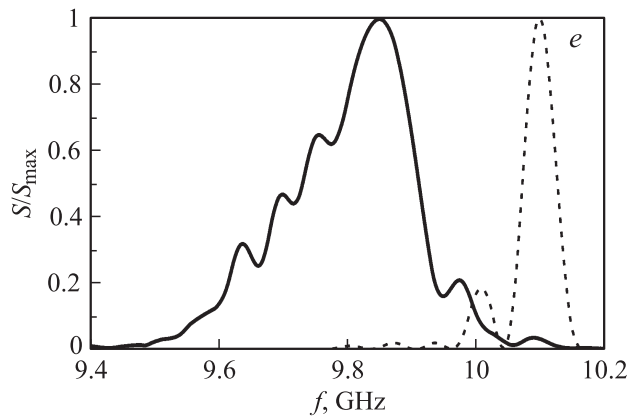
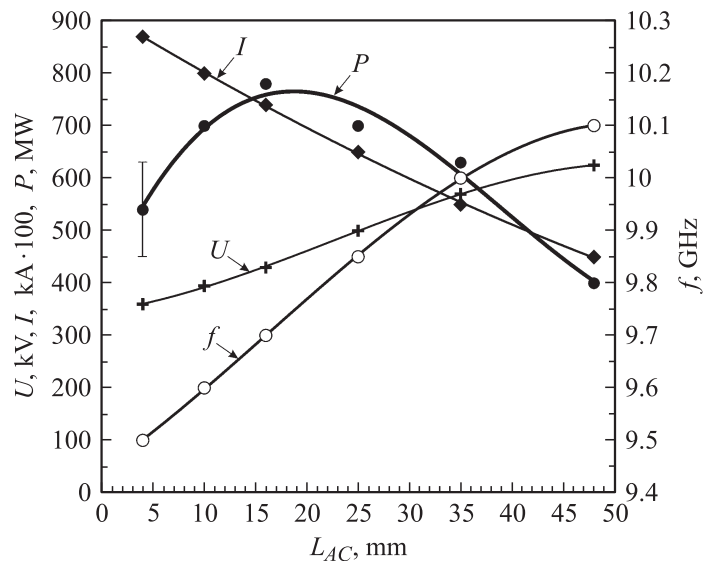


Рис. 2 (продолжение).

Для изменения импеданса вакуумного диода без развакуумирования системы использовалось перемещение металлического или диэлектрического анодного цилиндра 2. В случае металлического цилиндра уменьшение анод-катодного промежутка  $L_{AC}$  до величины порядка или меньше радиуса катода значительно снижает импеданс диода, а при длине промежутка порядка или больше радиуса внешней трубы  $R_A$  импеданс выходит на постоянное значение, определяемое соотношением между  $R_A$  и радиусом катода [7].

В экспериментах с подвижным металлическим цилиндром импульс напряжения имел плоскую вершину с величиной, регулируемой при изменении расстояния  $L_{AC}$  от 4 до 48 mm в пределах 350–630 kV (рис. 2, а). При этом ток пучка изменялся от 8.7 до 4.5 kA (рис. 2, а, 3). Таким образом, в широких пределах изменения импеданса диода мощность пучка была примерно постоянной. В хорошем соответствии с расчетами мощность и частота ЛОВ изменялись в пределах 400–800 MW и 9.5–10.1 GHz соответственно (рис. 3).

Кроме металлических цилиндров в экспериментах использовались цилиндры из капролона, стекла, оргстекла и фторопласта, которые приводили к совершенно иному воздействию на импульс. Основной эффект от диэлектриков состоял в значительном изменении формы импульса напряжения. При определенном соотношении между расстоянием от



**Рис. 3.** Зависимости ускоряющего напряжения  $U$ , тока пучка  $I$ , выходной мощности  $P$  и частоты генерации ЛОВ  $f$  от длины анод-катодного промежутка в случае использования металлического подвижного цилиндра.

кромки катода до края диэлектрического цилиндра  $2 L_{AC}$  и расстоянием до края металлического цилиндра на входе ЛОВ  $L_M$  напряжение на вершине импульса заметно падало. Величина перепада регулировалась длиной  $L_{AC}$  и при достаточно малых ее значениях (10–15 mm) могла достигать 200–250 kV (рис. 2, *c*). При этом по сравнению со случаем металлического цилиндра передний фронт импульса тока заметно „затягивался“ (рис. 2, *c*). Сильный перепад напряжения на вершине импульса (близкий к показанному на рис. 2, *c*) удавалось получить для всех перечисленных выше диэлектриков при некоторой вариации длин  $L_{AC}$  и  $L_M$ . Так, например, для оргстекла эти длины составили  $L_{AC} = 14$  mm и  $L_M = 48$  mm, для капролона  $L_{AC} = 11$  mm и  $L_M = 31$  mm, а для стекла  $L_{AC} = 10$  mm и  $L_M = 21$  mm.

Описанный эффект может быть объяснен совокупностью плазменных явлений (быстрый пробой по поверхности диэлектрика) и отклика формирующей линии ускорителя на резкое изменение импеданса нагрузки.

В эксперименте падение напряжения в течение импульса приводило к соответствующему уменьшению во времени частоты генерации ЛОВ (рис. 2, *d*) и существенному расширению спектра выходного сигнала по сравнению со случаем использования анодного цилиндра из металла (рис. 2, *e*). Мгновенная частота излучения определялась дифференцированием фазы сигнала, полученной в результате Фурье-анализа осцилляций на промежуточной частоте (рис. 2, *d*). Пиковая мощность излучения достигала в этом случае 700 MW.

Применительно к задаче пассивной компрессии импульса расчет показывает, что при использовании в качестве диспергирующей среды волновода с винтовой гофрировкой внутренней поверхности [2] полученной в исследованной ЛОВ частотно-модулированный импульс может быть сжат до длительности 2–3 ns с одновременным увеличением пиковой мощности в 5–7 раз.

Таким образом, в данной работе продемонстрированы возможности оперативной механической перестройки частоты генерации релятивистской ЛОВ от импульса к импульсу, обусловленной управляемым изменением импеданса взрывоэмиссионного магнитоизолированного диода. Отсутствие в использованном методе подвижных элементов в области сильных высокочастотных полей и коллектора электронного пучка может заметно упростить конструкцию частотно-перестраиваемого источника, работающего с высокой частотой следования импульсов, по сравнению с известным методом перестройки частоты, основанным на изменении промежутка между отражателем и замедляющей системой ЛОВ [8]. Кроме того, в данной работе продемонстрирован простой способ реализации формы импульса ускоряющего напряжения в виде плавного и контролируемого спада на вершине, приводящего к соответствующему изменению во времени частоты ЛОВ. Достижимый при этом интервал частотной модуляции позволяет, в частности, существенно увеличить пиковую мощность СВЧ-импульса за счет его пассивной компрессии.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 07-08-00244) и Комплексной программой президиума РАН „Фундаментальные проблемы релятивистской импульсной и стационарной электроники большой мощности“ (подпрограмма 1).

Авторы выражают благодарность Г.Г. Денисову и С.В. Кузикову за полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] *Samsonov S.V., Phelps A.D.R., Bratman V.L.* et al. // Phys. Rev. Letters. 2004. V. 92. P. 18301.
- [2] *Братман В.Л., Денисов Г.Г., Самсонов С.В.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 1. С. 40–53.
- [3] *Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 4. С. 232.
- [4] *Быков Н.М., Губанов В.П., Гунин А.В.* и др. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ ФН СССР, 1988. С. 101.
- [5] *Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотъменинов Е.М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [6] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [7] *Федосов А.И., Литвинов Е.А., Беломытцев С.Я.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1977. № 10. С. 134.
- [8] *Климов А.И., Куркан И.К., Полевин С.Д.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 24. С. 53–60.