

09;10;12

Генерация импульсов сверхизлучения сильноточными субнаносекундными электронными сгустками, движущимися в периодической замедляющей структуре

© Н.С. Гинзбург, Ю.В. Новожилова, И.В. Зотова, А.С. Сергеев,
А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, С.М. Виггинс, В. Хи, К. Рональд,
В.Г. Шпак, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов,
М.Р. Ульмаскулов, В.П. Тараканов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
Стратклайдский университет, Глазго, Великобритания
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
Институт физики высоких температур РАН, Москва, Россия

Поступило в Редакцию 23 марта 1998 г.

Экспериментально наблюдалась генерация ультракоротких микроволновых импульсов в процессе сверхизлучения (СИ) сильноточных электронных сгустков при пролете ими периодической замедляющей структуры. Процесс включал в себя бунчировку частиц внутри сгустка и последующее когерентное излучение со всего объема сгустка.

Проведенный в [1] анализ многочастотной динамики генераторов обратной волны показал, что по мере увеличения тока инжекции режим стационарной генерации сменяется режимом автомодуляции. При этом было отмечено, что амплитуда формирующегося в таких условиях на начальной стадии переходного процесса первого импульса существенно (в 2–3 раза) превосходит амплитуду стационарной генерации. В работе [2] было показано, что импульс имеет сверхизлучательную природу [4–7], поскольку его формирование обусловлено, с одной стороны, процессом бунчировки электронов, а с другой — взаимным влиянием различных частей электронного импульса через проскальзывание волны относительно частиц. В результате пиковая мощность данного импульса в определенной области параметров растет как квадрат тока, что свидетельствует о когерентном характере излучения начальной части импульса тока. Таким образом, если ограничить длительность импульса тока пучка величи-

ной, достаточной для формирования сверхизлучательного импульса, то следует ожидать генерации мощных ультракоротких микроволновых сигналов. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов генерации субнаносекундных импульсов на основе указанного механизма.

Ускоритель на базе наносекундного генератора РАДАН 303 с субнаносекундным обострителем использовался как инжектор коротких 0.5–0.9 ns, сильноточных 1–2 kA, электронных импульсов с энергией частиц 220–250 keV [8,9]. Эти импульсы генерировались в коаксиальном взрывоэмиссионном диоде с магнитной изоляцией. Специальная конструкция диодного узла обеспечила возможность плавного изменения ускоряющего зазора с целью варьирования тока инжекции. Для регистрации сигналов использовался цифровой осциллограф Тектроникс-7250 с полосой 7 GHz. Фокусировка сильноточных электронных сгустков осуществлялась постоянным магнитным полем с напряженностью до 10 T, создаваемым сверхпроводящим соленоидом. В таком поле было возможно реализовать режим периодического следования импульсов, соответствующий тактовой частоте инжектора 25 Hz.

Типичная осциллограмма СВЧ сигнала показана на рис. 1, *a* и состоит из нескольких импульсов. Первый импульс представляет собой импульс СИ, а последующие импульсы обусловлены отражением этого импульса, возникающего на сопряжении гофрированного и регулярного выходного волновода. Амплитуды вторичных импульсов в значительной степени снижались при плавном уменьшении глубины гофрировки на указанном сопряжении. Однако дополнительные отражения были полезны для определения групповой скорости излучения по интервалу между импульсами. Последняя составляла 0.3 s и соответствовала результатам численного моделирования процесса СИ, которое проводилось с помощью кода КАРАТ. На рис. 2, *a* показана геометрия системы и картина продольной бунчировки электронов, возникающей при пролете сгустка через замедляющую систему. Огибающая зависимости мощности излучения от времени (рис. 2, *b*) с хорошей точностью воспроизводит осциллограмму микроволнового сигнала.

Зависимость пиковой мощности от напряженности ведущего магнитного поля изображена на рис. 1, *b*. На этом рисунке видны область циклотронного поглощения, вблизи 3.5 T, и две области излучения со слабым 1.5–3 T и сильным > 4 T магнитными полями. Из предшествующих исследований длинноимпульсных релятивистских ЛОВ известно,

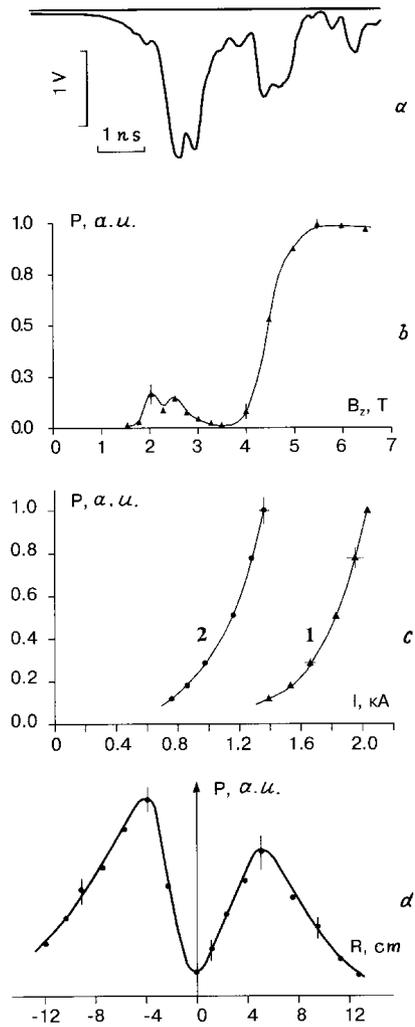


Рис. 1. *a* — осциллограмма СВЧ-сигнала, *b* — зависимость пиковой мощности от индукции ведущего магнитного поля, *c* — зависимость пиковой мощности СИ от тока инжекции (*1*) и прошедшего тока (*2*), *d* — диаграмма направленности излучения.

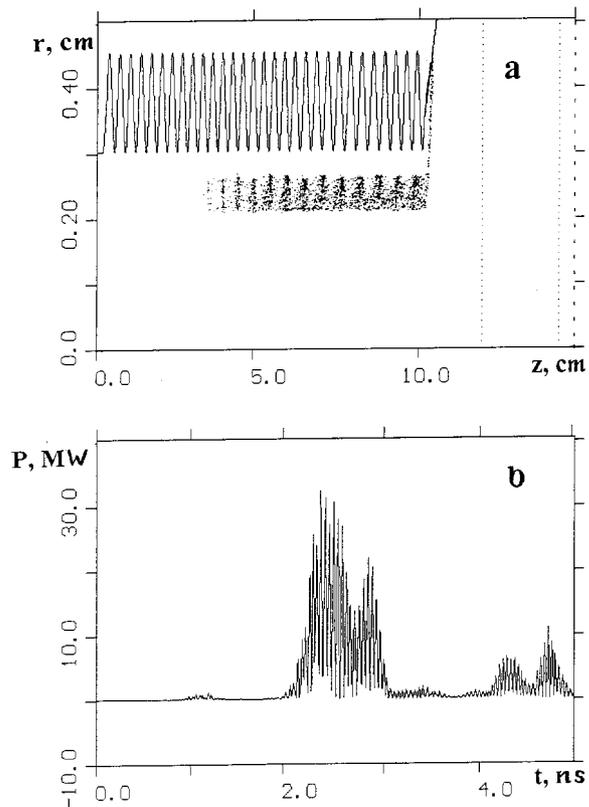


Рис. 2. Результаты моделирования процесса СИ: *a* — геометрия системы в полярных координатах и бунчировка частиц сгустка в момент времени 1 ns, *b* — выходная мощность излучения как функция времени.

что указанные источники имеют две области эффективной генерации, разделенные полосой циклотронного поглощения, которое возникает, когда условие циклотронного резонанса выполнено для основной гармоники волны, распространяющейся в периодической замедляющей системе [10–13]. Первые экспериментальные исследования генерации импульсов СИ на основе описанного выше механизма были проведены

при относительно малом фокусирующем магнитном поле 2Т импульсного соленоида [14], которое было меньше значения, соответствующего полосе циклотронного поглощения. Как видно из рис. 1, *b*, в случае сильных (превышающих резонансное значение) магнитных полей пиковая мощность излучения в 4–5 раз превышает уровень, полученный в предшествующих экспериментах. Увеличение мощности связано, в первую очередь, с улучшением качества формирования трубчатого электронного пучка взрывным катодом и уменьшением до 0.4 mm его толщины его стенки. Кроме того, фокусировка электронов сильным магнитным полем позволяет уменьшить зазор между замедляющей системой и сгустком, что увеличивает импеданс связи и соответствующие инкременты.

Исследование зависимости пиковой мощности от тока сгустка производилось варьированием длины ускоряющего промежутка анод–катод. При изменении указанного промежутка в пределах 3–11 mm ток сгустка изменялся от 1.3 до 2.1 kA. Однако одновременно происходило изменение импеданса диода и средняя энергия частиц изменялась в пределах 200–250 keV. Другим усложняющим обстоятельством в экспериментах явилась разбюстировка (~ 0.5 mm) катушки сверхпроводящего транспортирующего соленоида и электродинамической замедляющей системы, в результате которой при пролете сгустком канала дрейфа возникали значительные потери тока. Зависимость пиковой мощности СИ от тока инжекции и от прошедшего тока показаны на рис. 1, *c*. Обе зависимости находятся в удовлетворительном соответствии со следующей из теоретического анализа квадратичной зависимостью мощности от величины тока. Частотные измерения проводились с помощью наблюдения сигнала с детектора на горячих носителях после прохождения излучения через волноводные фильтры с различными частотами отсечки. Согласно этим измерениям, центральная частота излучения соответствовала расчетным 39 GHz, а относительная полоса спектра достигала 5%. Излучение имело поляризацию, соответствующую моде TM_{01} , которая после излучения в свободное пространство имеет только радиальную компоненту электрического поля. Действительно, при повороте приемного рупора на 90° наблюдалось не менее чем трехкратное падение амплитуды сигнала детектора. Измеренная перемещением рупора по одной из координат диаграмма направленности излучения представлена на рис. 1, *d* и имеет характерный для TM_{01} волны минимум в центре. Отметим, что распределение поля на рис. 1, *d* является несимметричным. Такая асимметрия объясняется ориентацией

германиевого детектора относительно градиента электрического поля. Распределение поля изменится на зеркально-симметричное при повороте детектора на угол 180° . Абсолютная мощность излучения, найденная интегрированием показаний детектора по диаграмме направленности, дает оценку на уровне 4–5 MW. Высокий уровень пиковой мощности излучения подтверждался также свечением панели из неоновых ламп, которая была расположена на расстоянии 30 см от выходного рупора. При этом картина свечения с хорошей точностью соответствовала моде TM_{01} . Другим важным подтверждением высокой мощности излучения явился высокочастотный пробой воздуха при атмосферном давлении, который наблюдался при фокусировке излучения параболическим зеркалом либо внутри сужающегося конического волновода. Более того, сравнение с результатами предшествующих наблюдений ВЧ-пробоев как от микроволновых, так и видеоимпульсов наносекундной и субнаносекундной длительности свидетельствует, что реальная пиковая мощность значительно превосходила уровень, следующий из показаний детектора. Здесь необходимо отметить, что эксперименты с ЛОВ с длительностью микроволновых импульсов 4–5 ns [13,15] указывают, что уровень мощности 4–5 MW недостаточен для развития пробоя даже для таких относительно длинных импульсов. С другой стороны, эксперименты с субнаносекундными видеоимпульсами демонстрируют [16], что при столь короткой длительности пробойная напряженность электрического поля должна достигать 150 kV/cm. Используя стандартную процедуру вычисления поля в коническом волноводе, получаем, что импульсам СИ такой напряженности поля должна соответствовать мощность излучения 25–30 MW. Следует отметить, что калибровка детектора осуществлялась с помощью магнетрона с длительностью импульсов 100 ns. То есть можно предположить, что имело место значительное занижение мощности сигнала при регистрации субнаносекундных импульсов детектором на горячих носителях.

Импульсы СИ характеризовались высокой степенью стабильности и повторяемости, что позволило реализовать режим периодического следования импульсов с частотой до 25 Hz при переводе ускорителя РАДАН 303 в соответствующий режим работы.

Таким образом, в результате проведенных исследований реализован новый импульсный источник, основанный на эффекте сверхизлучения сильноточных электронных сгустков. Получены микроволновые импульсы мегаваттного уровня мощности с рекордно короткой длительностью,

меньшей 1 ns. Представляет интерес использование импульсов СИ для исследования нелинейных эффектов в плазме и твердом теле, а также в локализованных приложениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 95-02-04791).

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. В. 7. С. 1037–1052.
- [2] Гинзбург Н.С., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 3. С. 359–363.
- [3] Bonifacio R.H., Maroli C., Piovella N. // Opt. Comm. 1988. V. 68. N 5. P. 369–374.
- [4] Bonifacio R.H., McNeil B.W.J., Pierini P. // Phys. Rev. A. 1989. V. 40. N 10. P. 4467–4471.
- [5] Гинзбург Н.С. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 5. С. 440–443.
- [6] Гинзбург Н.С., Сергеев А.С. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 54. В. 8. С. 445–448.
- [7] Mesyats G.A. et al. // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, USA, 1993. P. 835–842.
- [8] Shpak V.G. et al. // Proc. BEAMS'96. 11th Int. Conf on High Power Particle Beams. 1996. Prague, Czech Republic. P. 913–916.
- [9] Абубакиров Э.Б., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. В. 5. С. 1058–1066.
- [10] Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. В. 4. С. 232–235.
- [11] Коровкин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 3. С. 197–201.
- [12] Yalandin M.I. et al. // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, USA, 1993. P. 388–394.
- [13] Ginzburg N.S. et al. // Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. 1996. V. 393. P. 352–355.
- [14] Elchaninov A.S. et al. // Proc. Int. Conf. High-Power Part. Beams: BEAMS-86, Kobe, Japan, 1986. P. 552–556.
- [15] Yalandin M.I. et al. // Proc. of SPIE Int. Symp.: Intense Microwave Pulses III–V. 2557. San Diego, USA, 1995. P. 289–292.