

09;10;12

Генерация субнаносекундных импульсов сверхизлучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона

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

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Стратклайдский университет, Глазго

Поступило в Редакцию 12 июля 1999 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментального наблюдения генерации импульсов сверхизлучения в 4- и 2-миллиметровом диапазонах длин волн при прямолинейном движении сильнооточного электронного пучка субнаносекундной длительности через периодическую замедляющую систему. В 4-миллиметровом диапазоне мощность СВЧ-импульсов достигала 10–15 MW при длительности 150 ps.

В работах [1–4] описаны теоретические и экспериментальные исследования генерации ультракоротких электромагнитных импульсов 8-миллиметрового диапазона на основе эффектов сверхизлучения (СИ). Были исследованы различные механизмы СИ — циклотронный, ондуляторный, черенковский. При этом максимальная мощность излучения до 60 MW в импульсах длительностью 300 ps была достигнута для черенковского механизма, когда субнаносекундный электронный пучок, формируемый сильнооточным ускорителем РАДАН [5], излучал в периодической замедляющей структуре. Синхронное взаимодействие имело

место с первой обратной пространственной гармоникой волны E_{01} . Групповая скорость волны была направлена навстречу поступательному движению частиц. Использование сильного (до 5 Т) постоянного магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим соленоидом, позволило обеспечить режим периодического следования импульсов с тактовой частотой ускорителя до 25 Нз.

Данная работа посвящена описанию результатов следующего этапа исследований, в которых удалось наблюдать генерацию субнаносекундных импульсов СИ в коротковолновой части миллиметрового диапазона на частотах 75 и 150 GHz. В этих экспериментах был использован предшествующий опыт исследования коротковолновых релятивистских ЛОВ, запитываемых электронными пучками длительностью несколько наносекунд, позволяющих реализовать режим стационарной генерации [6].

Как и в экспериментах, проведенных ранее в 8-миллиметровом диапазоне [4], ускоритель на основе высоковольтного генератора РАДАН 303 с субнаносекундным обострителем использовался для инжекции электронного пучка с параметрами длительностью 0.5–1.5 ns, ток 0.5–1.5 кА, энергия электронов до 250 keV [5]. Пучок трубчатого сечения генерировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией на основе графитового взрывоэмиссионного катода. Для регистрации субнаносекундных сигналов с датчиков напряжения (емкостного делителя), тока пучка (цилиндра Фарадея) и СВЧ мощности (германиевого детектора на горячих носителях) использовались цифровой осциллограф Тектроникс 7250 и скоростной осциллограф С7-19 с полосой регистрации 7 и 5 GHz соответственно.

Транспортировка сильноточных электронных пучков через пространство взаимодействия осуществлялась в постоянное магнитное поле сверхпроводящего магнита либо импульсного соленоида с напряженностью до 5 Т. Рабочее пространство представляло собой участок гофрированного волновода с 17 периодами гофра. При этом глубина гофрировки плавно уменьшалась на последних периодах, обеспечивая согласование с выходным электродинамическим трактом. С катодного конца пространство взаимодействия было ограничено закритическим сужением, после отражения от которого генерируемый электромагнитный импульс высвечивался в направлении поступательного движения электронов. Для экспериментов в 4-миллиметровом диапазоне средний диаметр волновода составлял 3.75 mm, период гофра был выбран 1.7 mm

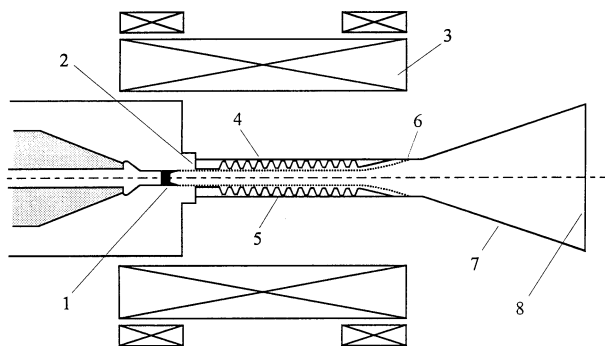


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — катод, 2 — анодный блок, 3 — обмотки сверхпроводящего соленоида, 4 — вакуумная камера, 5 — гофрированная замедляющая система, 6 — коллектор электронного пучка, 7 — рупорная антенна, 8 — вакуумное СВЧ-окно.

при глубине 0.37 мм. Как и при исследованиях относительно длинноимпульсных генераторов [6], для экспериментов в 2-миллиметровом диапазоне указанные выше геометрические размеры были уменьшены в два раза.

Предварительно процесс генерации моделировался с помощью кода КАРАТ [7]. Геометрия системы была выбрана соответствующей реальным условиям эксперимента (рис. 1). Таким образом, моделирование включало процесс формирования электронного импульса в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией. Предполагалось, что катод обладает неограниченной эмиссионной способностью, а ток в рабочем пространстве определялся самосогласованным образом. Для приведенной на рис. 1 конфигурации, соответствующей условиям эксперимента в 4-миллиметровом диапазоне, при подаче в подводящую коаксиальную линию импульса напряжения амплитудой 250 кВ в рабочем пространстве амплитуда тока достигала 800 А, что хорошо соответствовало экспериментальным данным. На рис. 2, а приведена расчетная зависимость мощности излучения от времени, из которой следует, что электронный ступок при пролете гофрированного волновода излучает короткий электромагнитный импульс с длительностью по полувисоте не более 150 пс и пиковой мощностью до 30 МВт (следует отметить, что усредненная

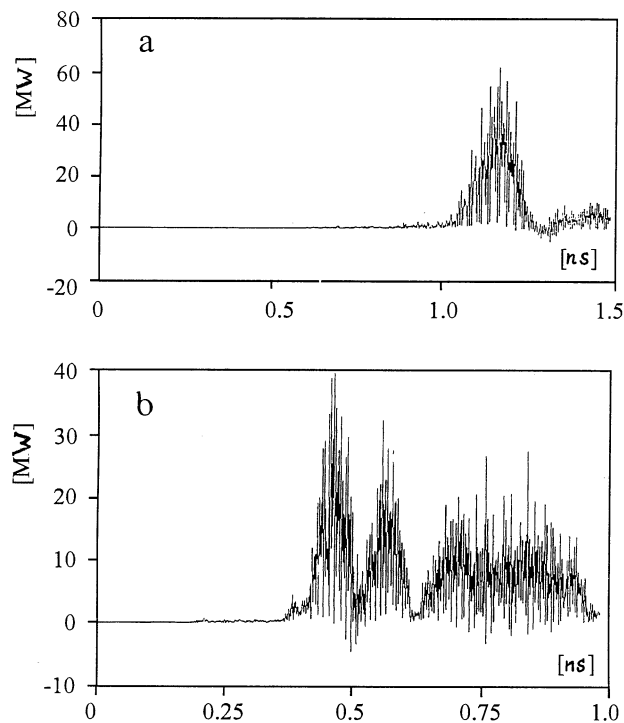


Рис. 2. Численное моделирование генерации импульсов сверхизлучения в диапазоне 75 GHz (*a*) и в диапазоне 150 GHz (*b*).

по периоду высокой частоты мощность составляет половину, указанной на рис. 2 мгновенной мощности). При этом излучение имело на выходе структуру волны E_{01} с центральной частотой 75 GHz.

На рис. 2, *b* показаны результаты моделирования излучения в 2-миллиметровой структуре. Следует отметить, что в расчетах длительность электронного импульса не была уменьшена пропорционально сокращению длины волны и длины пространства взаимодействия. По этой причине на выходе излучение представляет основной импульс с максимальной пиковой мощностью до 15 MW и серию последующих пиков меньшей амплитуды. Согласно результатам моделирования, для

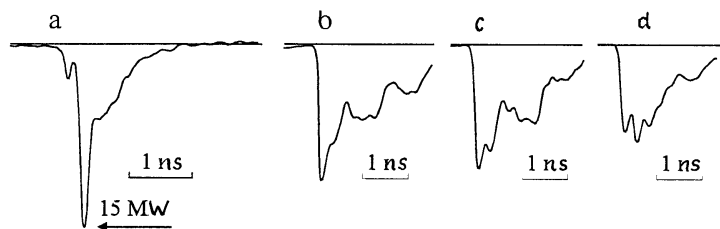


Рис. 3. Субнаносекундный СВЧ-импульс диапазона 75 GHz (*a*) и изменение формы СВЧ-импульсов диапазона 150 GHz по мере увеличения длительности и снижения амплитуды импульса тока пучка (*b-d*).

выделения главного импульса длительность электронного импульса следовало сократить до 0.2–0.3 ns. На данном этапе экспериментальных исследований указанное сокращение длительности электронного импульса не было проведено в виду того, что уменьшение длительности импульса ускоряющего напряжения с помощью срезающего разрядника связано со значительным уменьшением амплитуды ускоряющего напряжения.

На рис. 3, *a* представлена осциллограмма микроволнового импульса 4-миллиметрового диапазона. Как видно из осциллограммы, длительность фронта импульса не превышает 120 ps. Диаграмма направленности излучения соответствовала возбуждению моды E_{01} . Измерения абсолютной пиковой мощности были произведены интегрированием по диаграмме направленности показаний детектора, который был калиброван с помощью 4-миллиметровой релятивистской ЛОВ с длительностью импульса 3 ns [8] и calorиметра, конструкция которого аналогична описанной в [9]. Указанные измерения позволяют оценить пиковую мощность импульсов излучения на уровне 10–15 MW. Данные импульсы генерировались при ускоряющем напряжении на катоде 250 kV, токе инжекции 800 A, длительности электронного пучка 0.6–0.7 ns и напряженности ведущего магнитного поля 3.5 T. Следует отметить, что из-за ограничений по полосе пропускания кабельной линии задержки осциллографов основные характеристики (фронт, длительность и амплитуда) короткого ~ 150 ps импульса в эксперименте значительно искажались. В этой связи приведенную выше оценку пиковой мощности следует рассматривать как нижний предел реального значения. Высокий уровень

пиковой мощности электромагнитных импульсов подтверждался также наблюдением высокочастотного пробоя воздуха при концентрации излучения в приемном коническом рупоре круглого сечения, с выходным диаметром 8 mm. Вместе с тем, в отличие от экспериментов в 8-миллиметровом диапазоне [4], наблюдение СВЧ-пробоя в поле волны E_{01} с частотой 75 GHz не позволяет провести дополнительную оценку пиковой мощности ввиду отсутствия экспериментальных данных о пробивной прочности воздуха для импульсов длительностью ~ 100 ps.

Для генерации СВЧ-импульсов диапазона 150 GHz энергия электронов была снижена до 180–200 keV. Это потребовалось, чтобы при диаметре катода 1.2 mm предотвратить потерю тока из-за сильного коллимирования пучка на входе в замедляющую структуру, которая имела пролетный канал диаметром всего 1.5 mm. Снижение ускоряющего напряжения приводит к уменьшению поперечных скоростей электронов, эмитируемых катодом. Важно заметить, что в экспериментах с импульсами диапазона 150 GHz использовалось транспортирующее поле 2.5 T. На рис. 3, *b* представлен 150 GHz СВЧ-импульс, полученный в условиях, когда с волной E_{01} могли синхронно взаимодействовать только электроны, эмитированные на вершине ускоряющего импульса. Измеренная длительность фронта СВЧ-импульса была 75 ps, что совпадало с частотной границей трубки осциллографа C7-19. Эти данные соответствовали численным расчетам (рис. 2, *b*), которые для 150-GHz пика предсказывали длительность на полувысоте 70 ps. Между тем, калибровка осциллографа, кабельной линии задержки и других компонент тракта с помощью тестового 100-ps импульса показала, что амплитуда сигнала с СВЧ-детектора была занижена минимум в 2.5 раза. Абсолютной калибровки СВЧ-детектора в 2-миллиметровом диапазоне не проводилось. Однако если предположить, что снижение чувствительности детектора при переходе от 4-миллиметрового диапазона к 2-миллиметровому примерно совпадает со снижением чувствительности при переходе из 8-миллиметрового диапазона в 4-миллиметровый, то пиковую мощность 2-миллиметрового излучения можно оценить снизу на уровне 5–10 MW.

Увеличение длительности импульса тока пучка в наших экспериментах было возможно при одновременном увеличении ускоряющего напряжения, что, однако, сопровождалось частичной потерей тока из-за коллимирования. Полученные таким образом СВЧ-импульсы представлены на рис. 3, *c, d*. В результате, в согласии с данными численного

моделирования (см. рис. 2, *b*), генерируемое излучение представляет собой последовательность нескольких импульсов. Из-за наличия частотных ограничений измерительной системы мы предполагаем, что глубина модуляции импульсов гораздо больше, чем это представлено на рис. 3, *c, d*.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 98–02–17308.

Список литературы

- [1] *Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V., Konoplev I.V., Phelps A.D.R., Cross A.W., Cook S.J., Aitken P., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R.* // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78. N 12. P. 2365–2368.
- [2] *Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С., Ульмаскулов М.Р., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Феллс А.Д.Р., Кросс А.В., Кук С.* // *Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика.* 1998. Т. 6. № 1. С. 38–53.
- [3] *Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Phelps A.D.R., Cross A.W., Wiggins S.M.* // *DAN.* 1999. V. 365. N 1–3. P. 50.
- [4] *Гинзбург Н.С., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С., Ульмаскулов М.Р., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Фэллс А.Д.Р., Кросс А.В., Виггинс С.М., Ху В., Рональд К., Тараканов В.П.* // *Письма в ЖТФ.* 1998. Т. 24. В. 18. С. 7–13.
- [5] *Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I., Pegel I.V., Tarakanov V.P.* *Proc. BEAMS'96 — 11th Conf. on High Power Particle Beams.* June 10–14, 1996, Prague, Czech Republic. P. 913–916.
- [6] *Быков Н.М., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Шпак В.Г., Яландин М.И.* // *Письма в ЖТФ.* 1985. Т. 11. В. 9. С. 541–545.
- [7] *Tarakanov V.P.* *User's Manual for Code KARAT,* Berkeley Research Associates, Inc., VA, USA, 1992.
- [8] *Yalandin M.I., Mesyats G.A., Shpak V.G., Smirnov G.T., Shunailov S.A.* // *Proc. of SPIE Int. Symp. Intense Microwave Pulses.* Los Angeles, CA, USA. 1993. V. 1872. P. 333–342.
- [9] *Быков Н.М., Губанов В.П., Гунин А.В., Коровин С.Д., Ростов В.В., Яландин М.И.* // *Приборы и техника эксперимента.* 1987. № 6. С. 107–110.