

# Экспериментальное наблюдение эффекта сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильноточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности

А. Г. Реутова, М. Р. Ульмаскулов, А. К. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин<sup>1)</sup>, В. И. Белоусов<sup>+</sup>, Н. С. Гинзбург<sup>+</sup>, Г. Г. Денисов<sup>+</sup>, И. В. Зотова<sup>+</sup>, Р. М. Розенталь<sup>+</sup>, А. С. Сергеев<sup>+</sup>

*Институт электрофизики Уральского отделения РАН, 620016 Екатеринбург, Россия*

<sup>+</sup> *Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 19 мая 2005 г.

После переработки 12 июля 2005 г.

Наблюдался эффект генерации ультракоротких импульсов сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой (38 ГГц) волны накачки на сильноточном релятивистском электронном сгустке. Рассеянное излучение представляет собой одиночный  $\sim 200$  пс импульс с пиковой мощностью порядка 1 МВт. Благодаря доплеровскому смещению частоты излучения, в спектре рассеянного импульса представлены частоты до 150 ГГц.

PACS: 41.60.Cg, 52.59.Rz, 84.40.-x, 84.70.+p

1. В последнее время значительное внимание уделяется теоретическому и экспериментальному исследованиям эффектов сверхизлучения (СИ) сильноточных релятивистских электронных сгустков [1–7], которые могут служить основой для создания принципиально новых источников ультракоротких сверхмощных электромагнитных импульсов. Процесс СИ представляет собой когерентное излучение одиночного электромагнитного импульса протяженным в масштабе длины волны электронным сгустком. Соответственно, указанный процесс включает в себя развитие группировки частиц внутри сгустка, при этом синфазность излучения различных частей сгустка обеспечивается проскальзыванием волны относительно электронов вследствие отличия групповой скорости волны от поступательной скорости частиц. Сверхизлучение классических электронных ансамблей может быть связано с различными механизмами индуцированного излучения: циклотронным, черенковским, ондуляторным. К настоящему времени генерация импульсов СИ на основе указанных механизмов наблюдалась экспериментально [5–7] в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Генерация ультракоротких импульсов в более высокочастотных диапазонах может быть осуществлена с использованием нового механизма СИ, который реализуется в процессе вынужденного рассеяния мощ-

ной электромагнитной волны накачки на движущемся электронном сгустке [2, 8]. При условии, что волна накачки с частотой  $\omega_i$  распространяется навстречу потоку электронов, частота рассеянного излучения  $\omega_s$  вследствие эффекта Доплера должна существенно превышать частоту накачки [9]:

$$\omega_s = \omega_i \frac{1 + V_{\parallel}/V_{ph.i}}{1 - V_{\parallel}/V_{ph.s}}, \quad (1)$$

где  $V_{\parallel}$  – поступательная скорость электронов,  $V_{ph.i,s}$  – фазовые скорости волны накачки и рассеянной волны. Например, при рассеянии мощного лазерного излучения оптического диапазона на сильноточных пучках с энергией частиц 1–2 МэВ возможна генерация импульсов СИ в ультрафиолетовом диапазоне. Использование в качестве источников накачки мощных релятивистских электронных СВЧ генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов может позволить генерировать импульсы СИ в субмиллиметровом диапазоне.

Целью настоящей работы являлось проведение демонстрационных экспериментов по наблюдению обсуждаемого эффекта. Излучение мощной релятивистской лампы обратной волны 8-миллиметрового диапазона рассеивалось на сильноточном электронном сгустке с умеренно релятивистской ( $\gamma \sim 1.4$ – $1.6$ ) энергией частиц. Была зарегистрирована генерация субнаносекундных импульсов сверхизлучения в коротковолновой части миллимет-

<sup>1)</sup> e-mail: yalandin@iep.uran.ru

рового диапазона. Для сравнения с экспериментом приведена простая теоретическая модель, учитывающая волноводный характер распространения электромагнитного излучения, а также влияние фокусирующего магнитного поля.

2. Рассмотрим встречное рассеяние электромагнитной волны накачки на электронном сгустке с длительностью  $\Delta t_b$ , движущемся через гладкий цилиндрический волновод радиуса  $R$  вдоль однородного ведущего магнитного поля  $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{z}_0$ . В приближении фиксированной амплитуды волны накачки процесс генерации коротких одиночных импульсов рассеянного излучения (импульсов СИ) может быть описан системой уравнений, состоящей из нестационарного уравнения для амплитуды рассеянного поля и усредненных уравнений движения электронов в поле комбинационной волны:

$$\frac{\partial a_s}{\partial \zeta} + \frac{\partial a_s}{\partial \tau} = i f(\tau) a_i \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \mu \text{Im} \{ a_s a_i g e^{-i\theta} \},$$

где  $\zeta = \omega_c z/c$ ,  $\tau = \omega_c c(t - z/V_{\parallel})(1/V_{gr} - 1/V_{\parallel})^{-1}$ ,  $a_{i,s} = eA_{i,s}/2m_0\gamma c^2$  – нормированные амплитуды волн накачки и рассеянного излучения,  $V_{gr}$  – групповая скорость рассеянной волны,  $\theta = \omega_c t - k_c z$  – фаза электронов относительно комбинационной волны,  $\omega_c = \omega_s - \omega_i$ ,  $k_c = h_s + h_i$ ,  $h_{i,s}$  – продольные волновые числа волны накачки и рассеянной волны,  $\mu = \gamma_0^{-2} \beta_{\parallel}^{-3}$  – параметр группировки,  $I = (eJ_0/mc^3)(1/2\gamma_0 h_s k_c R^2 N_s)$ ,  $J_0$  – электронный ток,  $N_s$  – норма рассеянной волны. Параметр

$$g = J_{n_i-1}(k_{\perp i} R_b) J_{n_s-1}(k_{\perp s} R_b) \Omega / (\Omega - \omega_H) \quad (3)$$

описывает увеличение амплитуды осцилляций электронов в поле накачки в присутствии ведущего магнитного поля вблизи циклотронного резонанса,  $\omega_H = eH_0/m_0 c \gamma_0$  – гирочастота,  $\Omega = \omega_i + h_i V_{\parallel}$  – частота осцилляций электронов в поле накачки,  $J_n(x)$  – функция Бесселя,  $n_{i,s}$  – азимутальный индекс моды, определяющей поперечную структуру волн,  $R_0$  – радиус инжекции электронов,  $k_{\perp i,s}$  – поперечные волновые числа. Функция  $f(\tau)$  задает профиль электронного сгустка с нормированной длительностью  $\tau_b = \Delta t_b \omega_c c (1/V_{gr} - 1/V_{\parallel})^{-1}$ .

Уравнения (2) описывают совместное комбинационное воздействие на электроны поля накачки и рассеянной волны, которое приводит к возникновению группировки электронов внутри сгустка, в результате чего растет амплитуда рассеянной волны

(истощением волны накачки при условии  $\omega_s \gg \omega_i$  можно пренебречь [9]). Характерное для процесса СИ проскальзывание рассеянной волны относительно электронов приводит к синхронизации излучения различных частей протяженного сгустка и формированию рассеянного излучения в виде короткого импульса (рис.1). При численном моделировании пред-

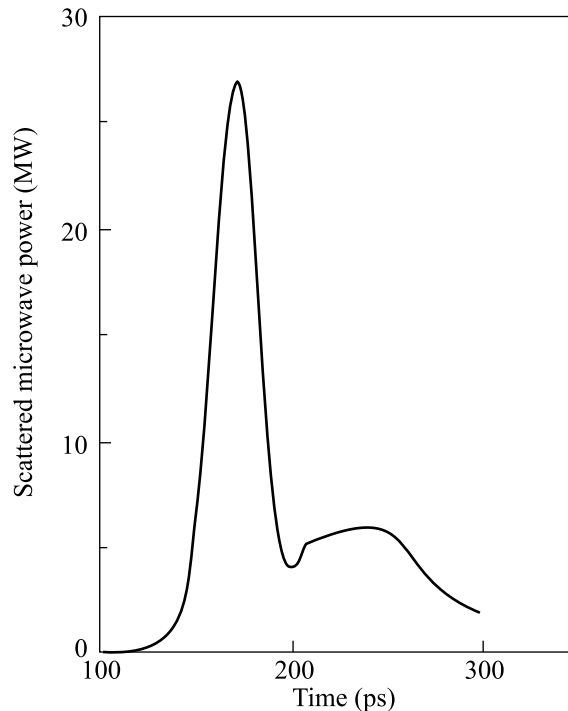


Рис.1. Импульс СИ при рассеянии волны накачки на релятивистском электронном сгустке. Параметры моделирования соответствуют условиям эксперимента

полагалось, что затравкой излучения является малая начальная модуляция плотности электронов. Параметры волны накачки и электронного сгустка выбирались близкими к условиям эксперимента. Волна накачки с мощностью 100 МВт и частотой 38 ГГц имела поперечную структуру моды  $TE_{11}$ . Рассеяние происходило в ту же моду в волноводе с радиусом 0.4 см и длиной 20 см на электронном сгустке с током 1 кА, энергией частиц – 200 кэВ, фокусируемом магнитным полем 24 кЭ. Расчетная частота рассеянной волны порядка 150 ГГц. Используемая при оценках длительность сгустка 200 пс соответствовала длительности плато с постоянной энергией вблизи пика импульса ускоряющего напряжения. Как видно из рис.1, в результате взаимодействия формируется короткий электромагнитный импульс с длительностью ~ 50 пс. Пиковая мощность составляет примерно 25 МВт.

3. Для экспериментальной реализации рассмотренного выше механизма СИ была создана установка на базе двух синхронизированных с субнаносекундной точностью сильноточных ускорителей РАДАН-303 [10], формирующих электронные пучки наносекундной и субнаносекундной длительности. На основе первого ускорителя генерировался низкочастотный импульс СВЧ волны накачки, который затем испытывал встречное рассеяние с повышением частоты на субнаносекундном пучке, формируемом вторым ускорителем. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис.2.

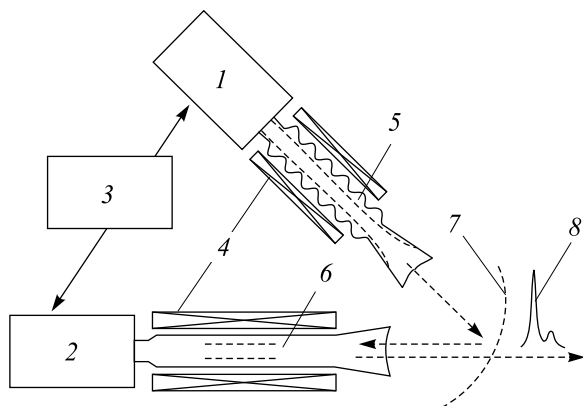


Рис.2. Принципиальная схема эксперимента по наблюдению СИ в процессе встречного рассеяния излучения релятивистской ЛОВ на сильноточном релятивистском сгустке: 1 – генератор 4 нс электронного пучка; 2 – генератор пучка с длительностью менее 1 нс; 3 – генератор синхронизирующих импульсов напряжения; 4 – импульсные соленоиды; 5 – электродинамическая система релятивистской ЛОВ диапазона 38 ГГц; 6 – зона рассеяния; 7 – параболический рефлектор; 8 – импульс СИ

В качестве генератора накачки в эксперименте использовалась релятивистская лампа обратной волны с частотой излучения 38 ГГц [11]. Осциллограмма импульса накачки длительностью  $\sim 4$  нс и мощностью 100 МВт представлена на рис.3а. Передача волны накачки  $TE_{11}$  в секцию рассеяния и вывод рассеянного излучения во внешнее пространство осуществлялись с помощью квазиоптического зеркала параболического профиля и системы рупорных антенн. Зеркало обладало высокими отражающими свойствами для низкочастотной волны накачки: коэффициент передачи зеркала на частоте 38 ГГц составлял  $\sim 95\%$ . В то же время частичная прозрачность зеркала для высокочастотного излучения с частотой более 60 ГГц обеспечивалась ортогональной решеткой из отверстий диаметром 3 мм с шагом 4 мм. На рис.3б представлена осциллограмма сигнала с СВЧ

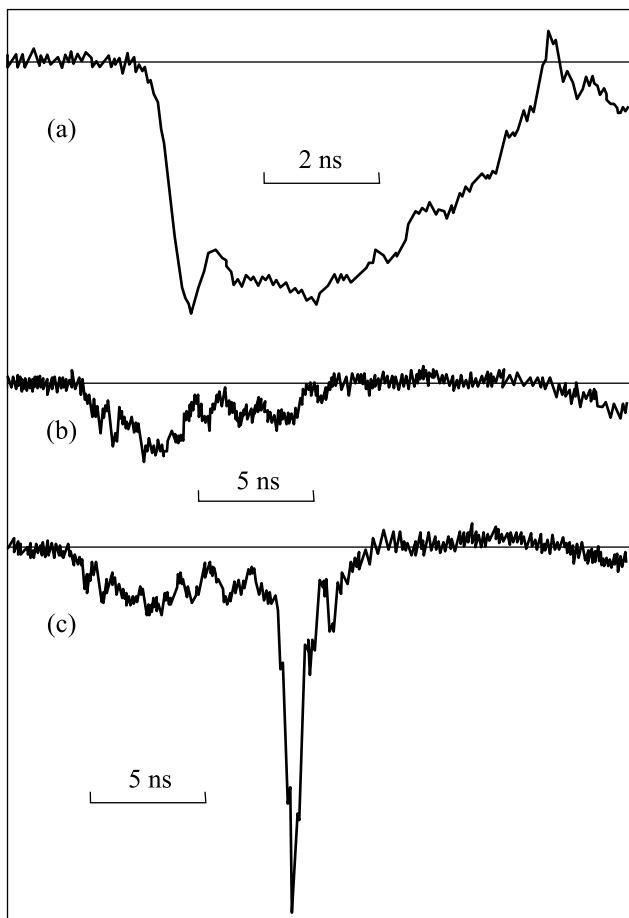


Рис.3. (а) Типичный импульс сигнала СВЧ детектора, регистрирующего огибающую мощности волны накачки. (б) Сигнал СВЧ детектора в отсутствие рассеивающего электронного сгустка, обусловленный наличием в спектре волны накачки гармоник на кратных частотах. (в) Импульс СИ, регистрируемый СВЧ детектором при включении рассеивающего электронного сгустка

детектора на горячих носителях, установленного за квазиоптическим зеркалом, в отсутствие рассеивающего пучка. Регистрируемый в данном случае импульс был обусловлен паразитным высокочастотным излучением генератора волны накачки на гармониках рабочей частоты.

В секции рассеяния, представляющей собой участок гладкого волновода с длиной  $\sim 40$  см, волна накачки распространялась навстречу сильноточному (250–300 кэВ, 1–1.5 кА) субнаносекундному ( $\sim 600$  пс по полувысоте) электронному пучку, формируемому вторым ускорителем. В отсутствие волны накачки шумовое излучение рассеивающего пучка было мало и не регистрировалось СВЧ детектором, установленным после квазиоптического зеркала. При включении рассеивающего пучка в регистрируемом сиг-

нале появлялся короткий пик большой амплитуды (рис.3с), который может быть интерпретирован как импульс сверхизлучения. Ширина импульса СИ по полувысоте с учетом вольт-ваттной нелинейности использованного в измерениях СВЧ детектора не превосходит 200 пс. Импульсы СИ наблюдались в достаточно большой области перестройки напряженности ведущего магнитного поля. При этом наибольшая мощность импульсов СИ была получена в диапазоне 20–25 кЭ, в котором, согласно (3), магнитное поле оказывало заметное влияние на величину осцилляторной скорости частиц.

Для анализа частотного состава излучаемого импульса в тракт детектора устанавливались калиброванные волноводные фильтры низких частот. Относительная амплитуда откликов детектора, определяемых прошедшими через фильтры СВЧ сигналами при различных частотах отсеки фильтров, представлена на рис.4. Величина перепада ступенчатой линии

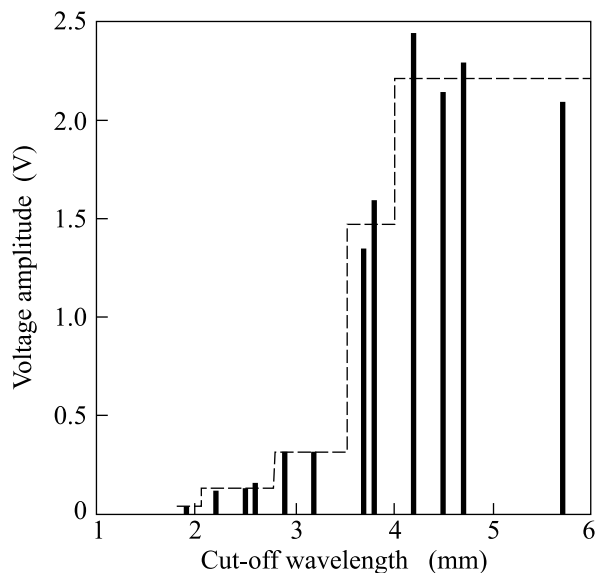


Рис.4. Результаты измерений спектрального состава рассеянного излучения. Зависимость амплитуды сигнала СВЧ детектора от длины волны отсеки волноводных фильтров низких частот

характеризует относительное содержание различных спектральных составляющих в микроволновом импульсе. Таким образом, основная доля мощности излучения сосредоточена в интервале от 3.5 ÷ 4.2 мм. Однако имеются как более низкочастотные, так и более высокочастотные компоненты, в том числе с длиной волны около 2 мм, близкой к расчетной. При этом необходимо отметить, что из-за уменьшения чувствительности детектора с укорочением длины волны реальное падение мощности в области коротких волн

должно быть гораздо меньшим, чем это представлено на рис.4. Значительное уширение спектра излучения по сравнению с исходной теоретической моделью может быть объяснено возбуждением нескольких волноводных мод, которым соответствуют меньшие фазовые скорости, а следовательно, и меньшие частоты рассеянных волн. Кроме того, в реальном сильноточном сгустке неизбежно возникает значительный энергетический и скоростной разброс электронов. Эти факторы также приводят к увеличению длительности импульса СИ по сравнению с результатами моделирования.

Интегральная по спектру мощность в пике излучения оценочно достигала 1 МВт. Приведенная величина определена по уровню мощности, фиксируемой СВЧ детектором с учетом апертуры приемной антенны детектора, расстояния до излучателя и характерной ширины диаграммы направленности излучения. Следует, однако, отметить приближенность сделанных оценок. С одной стороны, имеет место снижение чувствительности детектора на горячих носителях, калибровка которого проводилась на частоте 38 ГГц, при регистрации излучения в более коротковолновом диапазоне – вплоть до 150 ГГц. С другой стороны, конструкция и расположение параболического квазиоптического зеркала приводили к сложной интерференционной картине излучения на выходе установки, что затрудняло суммирование показаний детектора по диаграмме направленности.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов наблюдался эффект генерации коротких импульсов сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной СВЧ волны накачки диапазона частот 38 ГГц на сильноточном релятивистском электронном сгустке. Рассеянное излучение представляло собой одиночный ~ 200 пс импульс с интегральной по спектру мощностью до 1 МВт. Благодаря доплеровскому смещению частоты излучения, в спектре рассеянного импульса были представлены частоты до 150 ГГц. Указанный эффект может быть интерпретирован как эффект сверхизлучения электронного сгустка, поскольку излучение имело место в отсутствие внешнего высокочастотного сигнала, а также внешних резонаторов, то есть не могло быть следствием традиционных механизмов усиления или автогенерации. Кроме того, вследствие развития группировки частиц внутри протяженного электронного сгустка мощность рассеянного сигнала существенно превышала мощность шумового спонтанного излучения в поле накачки, обусловленного флуктуациями плотности сгустка, а длительность импуль-

сов была существенно короче длительности указанных шумов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 05-02-17553-а.

1. R. Bonifacio, N. Piovella, and B. W. J. McNeil, *Phys. Rev. A* **44**, 3441 (1991).
2. Н. С. Гинзбург, А. С. Сергеев, *Письма в ЖЭТФ* **54**, 446 (1991).
3. Л. А. Вайнштейн, А. И. Клеев, *ДАН* **311**, 862 (1990).
4. Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, А. С. Сергеев, *Письма в ЖЭТФ* **60**, 501 (1994).
5. N. S. Ginzburg, A. S. Sergeev, I. V. Zotova et al., *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2365 (1997).
6. В. Г. Шпак, М. И. Яландин, С. А. Шунайлов и др., *ДАН* **365**, 50 (1999).
7. А. А. Ельчанинов, С. Д. Коровин, В. В. Ростов и др., *Письма в ЖЭТФ* **77**, 314 (2003).
8. Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, А. С. Сергеев и др., *Письма в ЖТФ* **26**, 103 (2000).
9. В. Л. Братман, Н. С. Гинзбург, М. И. Петелин, *ЖЭТФ* **49**, 777 (1979).
10. М. И. Яландин, В. Г. Шпак, *ПТЭ* **3**, 5 (2001).
11. M. I. Yalandin, G. T. Smirnov, V. G. Shpak et al., *In Proc. of the 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA*, **1**, 1993, p. 388.