

09;10;12

Черенковское сверхизлучение субнаносекундного электронного сгустка в секционированной замедляющей системе

© М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, В.Г. Шпак, Н.С. Гинзбург,
И.В. Зотова, А.С. Сергеев, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, П. Айткен

Институт экспериментальной физики УрО РАН, Екатеринбург
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Стратклайдский Университет, Глазго, Великобритания

Поступило в Редакцию 30 июля 1997 г.

Экспериментально исследовано индуцированное когерентное излучение (сверхизлучение) субнаносекундного электронного сгустка в комбинированной замедляющей системе. В первой секции в виде периодически гофрированного волновода происходила модуляция плотности сгустка, который затем излучал во второй секции в виде частично заполненного диэлектриком волновода. При энергии электронов 250 keV, пиковом токе 800 А получены импульсы миллиметрового излучения мощностью до 2 MW и длительностью до 800 ps.

В последнее время большой интерес вызывает исследование процессов когерентного излучения изолированных электронных сгустков, размеры которых, хотя и превышают длину волны СВЧ-излучения, но тем не менее существенно короче характерных длин пространства взаимодействия. Возможность получения когерентного излучения от подобных сгустков была понята относительно недавно и связана с так называемыми эффектами сверхизлучения [1–5]. При развитии подобного процесса внутри электронного сгустка происходит группировка частиц, сфазированность которой обусловлена проскальзыванием излучения относительно сгустка вследствие отличия групповой скорости излучения от поступательной скорости частиц.

Результаты первых экспериментальных наблюдений черенковского сверхизлучения в миллиметровом диапазоне длин волн обсуждались в [6,7]. В качестве источника электронных импульсов субнаносекундной длительности использовался сильноточный ускоритель на основе

генератора РАДАН 303, обострителя импульсов и коаксиального магнитоизолированного вакуумного диода с взрывоэмиссионным катодом [8]. Сверхизлучение наблюдалось в двух типах замедляющих систем. Во-первых, в гофрированном волноводе, в котором электронный сгусток взаимодействовал с попутной пространственной гармоникой встречной электромагнитной волны в условиях синхронизма, аналогичных имеющим место в лампах обратной волны (ЛОВ):

$$\omega = (-k + \bar{k})V_{\parallel},$$

где V_{\parallel} — поступательная скорость электронов, ω и k — частота и продольное волновое число соответственно, $\bar{k} = 2\pi/d$, d — период гофрировки. В качестве альтернативной замедляющей системы был использован регулярный волновод, частично заполненный диэлектриком. Здесь волна излучалась в направлении поступательного движения частиц и взаимодействие осуществлялось в условиях

$$\omega = kV_{\parallel}.$$

Для первой системы (гофрированный волновод длиной 8 см) был характерен высокий уровень стабильности и повторяемости микроволновых импульсов при умеренном уровне пиковой мощности 0.5 MW. При этом диаграмма направленности излучения в хорошей степени соответствовала возбуждению моды E_{01} . При сверхизлучении в диэлектрическом волноводе, типичная длина которого составляла 30 см, пиковая мощность излучения достигала 1 MW. Однако излучение имело значительно меньшую стабильность и представляло собой совокупность волн E_{01} и гибридной волны HE_{11} .

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование сверхизлучения электронного сгустка в комбинированной (секционированной) замедляющей системе, в которой первая секция в виде гофрированного волновода служила модулятором электронного сгустка, а вторая секция в виде частично заполненного диэлектриком волновода представляла собой область высвечивания (усиления). Достоинством секционированной системы является возможность сочетания высокой степени стабильности и повторяемости импульсов сверхизлучения, характерной для систем типа ЛОВ, с высокой пиковой мощностью, достигнутой ранее при излучении электронного сгустка в диэлектрическом волноводе. Как и в предшествующих экспериментах, субнаносекундный ускоритель

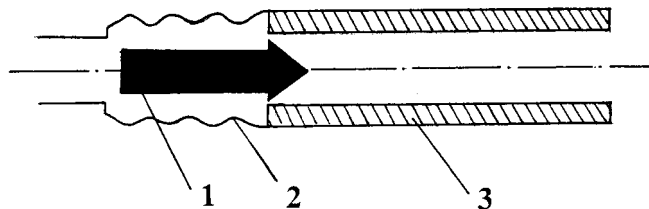


Рис. 1. Схема микроволновой части экспериментальной установки: 1 — электронный сгусток, 2 — модулятор в виде секции гофрированного волновода, 3 — область высвечивания в виде частично заполненного диэлектриком волновода.

генерировал пучок с длительностью токового импульса 300–500 ps и характерной энергией электронов 250 keV. Микроволновые импульсы регистрировались калиброванным германиевым детектором на горячих носителях с переходной характеристикой 200 ps. Для записи сигналов с датчиков тока, ускоряющего напряжения и СВЧ-сигнала использовался цифровой осциллограф Тектроникс 7250 с полосой регистрации 7 GHz. Схема микроволнового блока экспериментальной установки показана на рис. 1. Длина гофрированного участка круглого волновода составляла 3 см, период гофрировки был равен 3.3 mm при глубине гофра 0.8 mm и среднем диаметре волновода 8 mm. Длина второй секции достигала 20 см. В качестве этой замедляющей системы использовалась композиционная диэлектрическая втулка с диэлектрической постоянной ~ 3.5 .

Об эффективности работы секционированной системы свидетельствует рис. 2, а, из которого следует, что установка модулятора примерно в 5 раз увеличивала пиковую мощность микроволнового импульса по сравнению с излучением только в диэлектрическом канале. Заметим также, что в отсутствие второй секции, т.е. при пролете электронного сгустка только через короткий модулятор, выходной сигнал был на уровне шумов и практически не регистрировался детектором. Спектральный состав излучения оценивался с помощью установки в тракт детектора волноводных фильтров высоких частот (запредельных волноводов) с различными частотами отсечки.

На рис. 2, б показана эволюция формы микроволнового импульса при прохождении сигнала через различные фильтры. Из этих данных можно сделать вывод, что спектр импульсов лежит в диапазоне приблизительно

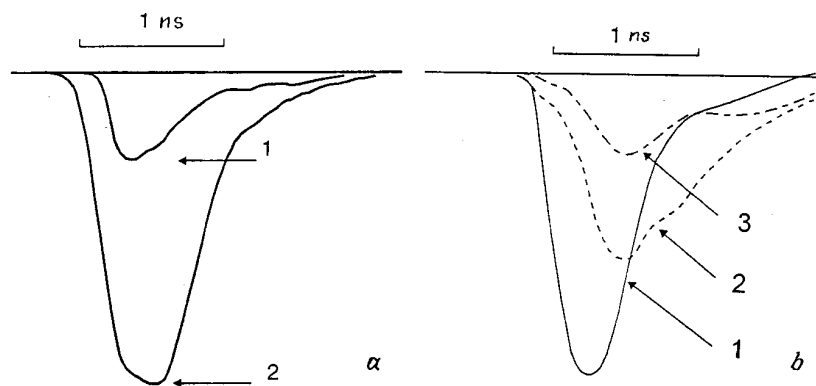


Рис. 2. *a* — сигналы с СВЧ-детектора, полученные без модулятора (кривая 1) и при его наличии (кривая 2). *b* — трансформация сигнала при установке в волноводный тракт фильтров высоких частот.

от 36 до 40 GHz. Диаграмма направленности излучения, представленная на рис. 3, *a*, была снята детектором, приемный рупор которого был ориентирован для приема E_r компоненты поля.

В идеальном варианте входная секция должна не только модулировать электронный сгусток по продольной координате, но и задавать поперечную структуру этой модуляции, навязывая тем самым излучению во второй секции пространственную структуру в виде E_{01} волны. Как известно, при возбуждении такой волны диаграмма направленности излучения должна иметь ноль (глубокий минимум) на оси системы. Отсутствие подобного минимума свидетельствует о присутствии гибридной HE_{11} волны в спектре излучения. Это может быть объяснено азимутальной неоднородностью электронного сгустка во второй секции. Подобная неоднородность вызвана исходной неоднородностью эмиссионной поверхности трубчатого катода, а также некоторой разъюстировкой системы. По крайней мере, отпечатки сгустка в различных сечениях электродинамического тракта действительно свидетельствовали о поперечной асимметрии сгустка.

Процентный состав паразитной HE_{11} волны различен в начале и в хвосте микроволнового импульса. Это следует из сравнения осциллограмм сигнала, снятых детектором, расположенным вблизи оси системы (позиция 1, рис. 3, *b*) и на периферии (позиция 2, рис. 3, *c*). Видно, что

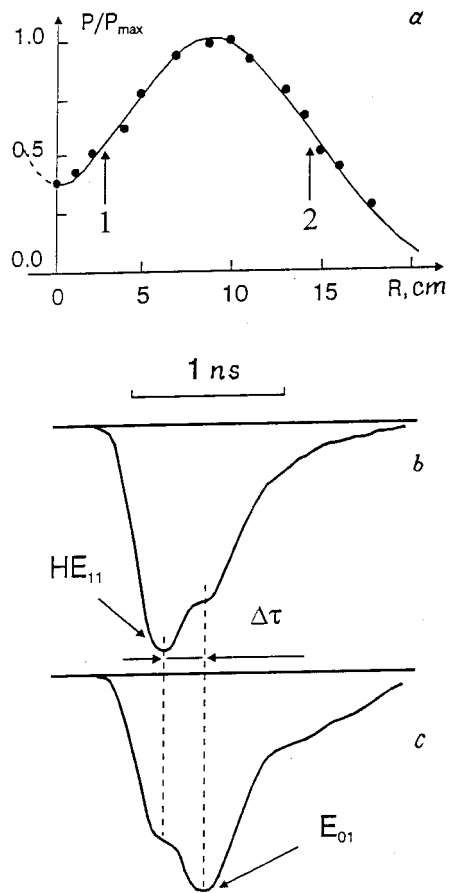


Рис. 3. Диаграмма направленности излучения (а). Отмечены два положения СВЧ-детектора вдоль радиальной координаты, при которых наблюдались сигналы, изображенные на рис. *b* и *c*.

имеет место относительное увеличение амплитуды сигнала в хвостовой части импульса для рупора в позиции 2 и соответствующий спад для рупора в позиции 1. Таким образом, для хвостовой части импульса диаграмма оказывается более соответствующей возбуждению рабочей

E_{01} моды. Для интерпретации этого факта следует принять во внимание, что для передней части электронного импульса первая секция работает только как модулятор электронного потока. Вместе с тем генерируемое в этой секции микроволновое излучение в виде встречной по отношению к сгустку E_{01} электромагнитной волны после отражения от закритического сужения, установленного на пушечном конце системы, пройдя модулятор уже в попутном с электронами направлении, попадает во вторую секцию, где вновь вступает во взаимодействие с хвостовой частью электронного сгустка. Таким образом, для хвостовой части возникает дополнительное воздействие со стороны сигнала, поступающего из первой секции с задержкой $\Delta\tau \approx 300$ ps и навязывающее излучению в конечном итоге пространственную структуру E_{01} волны.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали оправданность использования секционированной замедляющей системы для генерации мощных импульсов черенковского сверхизлучения. Пиковую мощность излучения удалось увеличить до 2 MW при суммарном укорочении (с 30 до 23 см) электродинамической системы, улучшении диаграммы направленности и повторяемости импульсов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 95-02-04791.

Список литературы

- [1] *Bonifacio R., Maroli C., Piovella N.* // Opt. Commun. 1988. V. 68. P. 369–376.
- [2] *Bonifacio R., Piovella N., McNeil B.W.J.* // Phys. Rev. A. 1991. V. 44. P. 3441–3448.
- [3] *Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 7. С. 501–505.
- [4] *Гинзбург Н.С., Новожилова Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 3. С. 39–44.
- [5] *Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Konoplev I.V., Phelps A.D.R., Cross A.W., Cooke S.J., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunaiov S.A., Ul'maskulov M.R.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. N 12. P. 2365–2368.
- [6] *Phelps A.D.R., Cross A.W., Cooke S.J. et al.* // Proc. of Int. Workshop on Strong microwave in plasmas IAP RAS. 1996. V. 2. P. 791–809.
- [7] *Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S.* // Abst. of 18th Int. Conf. on Free Electron Lasers. Rome, Italy, 1996. P. 50.
- [8] *Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р., Яландин М.И., Пегель И.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 7. С. 65–69.