

ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОННЫМ СГУСТКОМ В ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ТИПА ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

© Н. С. Гинзбург, Ю. В. Новожилова, А. С. Сергеев

В последнее время все более возрастающий интерес проявляется к исследованию возможности генерации мощного ультракороткого широкополосного электромагнитного (э.м.) импульса в процессе коллективного когерентного излучения электронного сгустка [1-5]. При этом предполагается, что длина сгустка меньше длины области высвечивания, но существенно превосходит длину волны излучения. Когерентность излучения со всей длины электронного сгустка обусловлена возникновением автофазировки (группировки) частиц внутри сгустка. В настоящей работе показано, что такой процесс может иметь место при движении электронного сгустка в периодической замедляющей системе типа лампы обратной волны.

Эффективное взаимодействие электронов, движущихся прямолинейно с поступательной скоростью V_0 , со встречной э.м. волной возможно при синхронизме электронов с какой-либо пространственной гармоникой волны. Предположим, что продольное электрическое поле синхронной гармоники может быть представлено в виде

$$E_z = \operatorname{Re} \left(A(z, t) e^{i(\omega_0(t-z/v_0))} \right), \quad (1)$$

где $A(z, t)$ — плавно меняющаяся амплитуда гармоники. В этом случае для описания взаимодействия электронов с полем излучения справедлива следующая система нестационарных уравнений [6,7]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \zeta} \right) a = -J, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = -\operatorname{Re}(ae^{i\theta}).$$

Здесь использованы безразмерные величины: $\zeta = \beta C z$ — продольная координата, $\tau = \omega_0 C (t - \frac{z}{V_0}) (1 + \frac{V_0}{V_{rp}})^{-1}$ —

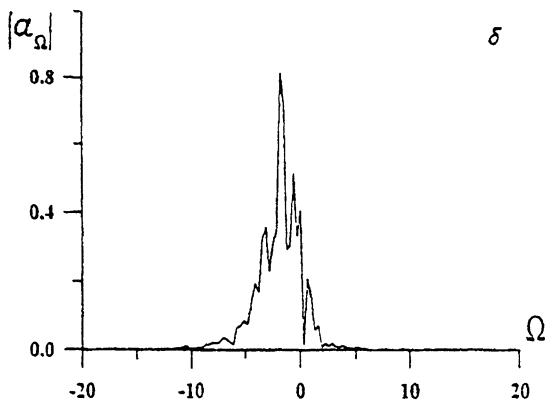
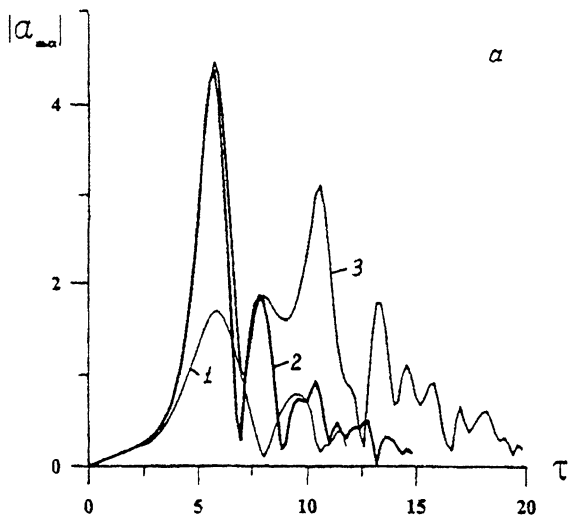


Рис. 1. а — зависимость амплитуды выходного сигнала от времени при различной длительности электронного импульса, $L = 10$: 1 — $T_{\text{имп}} = 2$, 2 — $T_{\text{имп}} = 5$, 3 — $T_{\text{имп}} = 10$; б — спектр излучения $|a_{\Omega}|$ при $T_{\text{имп}} = 5$, $L = 10$.

временная переменная, $v_{\text{гр}}$ — групповая скорость волны, C — параметр усиления (параметр Пирса), $\theta = \omega_0 t - h_0 z$ — фаза электронов относительно синхронной волны,

$J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-i\theta) d\theta_0$ — амплитуда ВЧ тока, характеризующая степень группировки частиц. Заметим, что при записи (1), (2) в качестве несущей частоты выбрана частота точного синхронизма: $\omega_0/h_0 = v_0$, $a = \frac{A_f}{\beta C^2 \gamma_0 (\gamma_0^2 - 1) m c^2}$ — без-

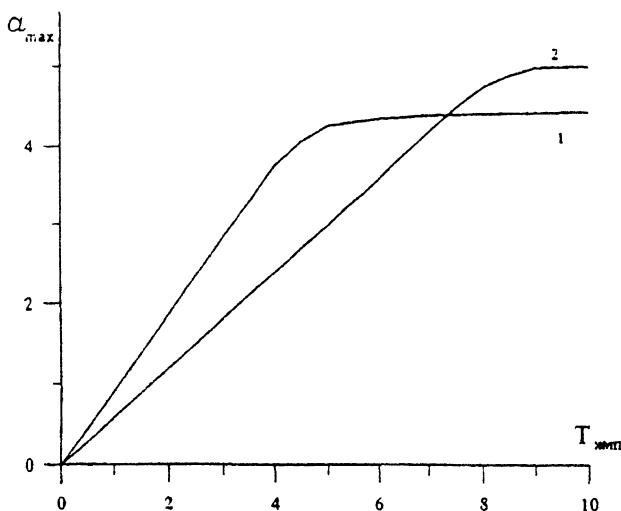


Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды от длительности электронного импульса при различных начальных затравках. 1 — $r = 0.1$, 2 — $r = 0.001$.

размерная амплитуда электрического поля волны излучения.

Для задания граничных условий будем считать, что на входе в пространство взаимодействия ($\zeta = 0$) электроны имеют малую модуляцию по плотности

$$\theta \Big|_{\zeta=0} = \theta_0 + r \cos \theta_0 (|r| \ll 1), \quad \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = 0, \quad (3)$$

$$\theta_0 \in (0, 2\pi)$$

и, кроме того, отсутствует поток э.м. энергии, падающий на систему извне:

$$a \Big|_{\zeta=L} = 0. \quad (4)$$

Здесь L — длина пространства взаимодействия (нормированная длина периодической структуры).

Таким образом, рассматриваемая система характеризуется двумя независимыми параметрами: длиной пространства взаимодействия L и нормированной длительностью электронного импульса $T_{\text{имп}}$.

На рис. 1, а представлены результаты численного моделирования процесса излучения при различной протяженности электронных сгустков $T_{\text{имп}}$. Как видно из приведенных графиков, на начальной стадии происходит формирование э. м. импульса, пиковая амплитуда которого превосходит

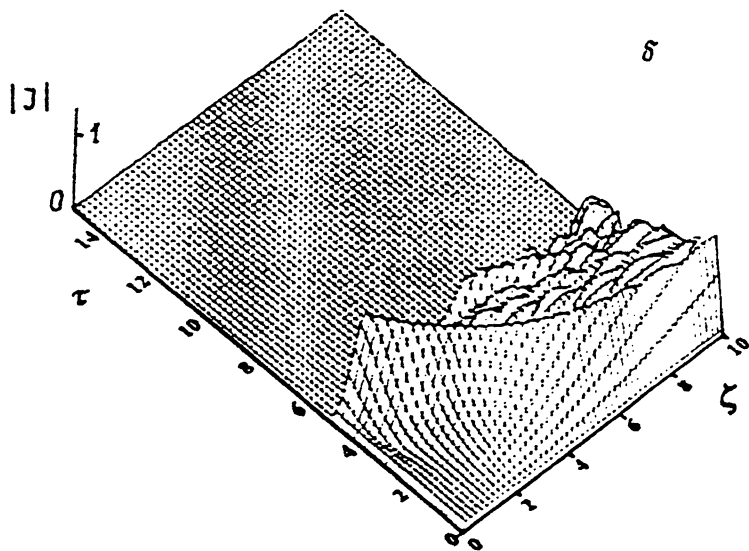
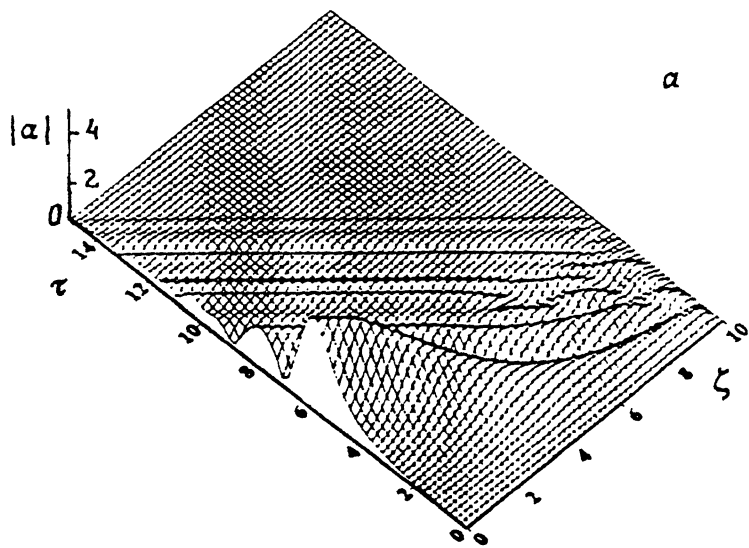


Рис. 3. Пространственно-временное распределение амплитуды э. м. поля $|a|$ (а) и ВЧ тока $|J|$ (б) при $L = 10$, $T_{\text{имп}} = 5$.

амплитуду последующих импульсов. Заметим, что амплитуда основного СВЧ импульса и его длительность не зависят от длины области взаимодействия L , если эта длина достаточно велика. В этом случае от L зависит только количество дополнительных импульсов.

Зависимость максимальной амплитуды э. м. импульса от протяженности сгустка показана на рис. 2 при двух различных начальных модуляциях. Важно подчеркнуть, что при малой длительности электронного импульса амплитуда увеличивается по линейному закону. Соответственно пиковая мощность растет пропорционально квадрату числа частиц, что свидетельствует о когерентном характере излучения со всего объема сгустка. Однако при увеличении длительности токового импульса происходит насыщение роста амплитуды. При этом чем меньше уровень начальной модуляции, тем больше максимальный уровень пиковой мощности, что может быть объяснено увеличением области формирования главного импульса.

Механизм формирования главного импульса иллюстрируется рис. 3, на котором представлено пространственно-временное распределение амплитуды поля и амплитуды ВЧ тока. Видно, что амплитуда ВЧ тока испытывает пульсации по длине пространства взаимодействия, обусловленные периодически повторяющейся группировкой и разгруппировкой электронов. Фазы этих максимумов тока смещены на π . Главный импульс формируется э. м. лучами ($\tau = -\zeta + \text{const}$), проходящими только через первый максимум ВЧ тока. После прохождения главного э. м. импульса амплитуда выходного излучения убывает, поскольку формирующие лучи проходят последовательно области с различными фазами тока, так что э. м. поле последовательно усиливается и поглощается электронным потоком. В результате в оптимальных условиях пиковая мощность импульса ($|a^2|_{\text{max}} = 25$) примерно в шесть раз превосходит мощность излучения в стационарном режиме генерации ($|a^2|_{\text{max}} = 4$) [8].

Важной особенностью рассматриваемого процесса является малая длительность главного микроволнового импульса, которая при значении параметра Пирса $C = 0.1$ составляет примерно десять периодов ВЧ колебаний. Спектр импульса является широкополостным и представлен на рис. 1, б. Интересно подчеркнуть, что характерная ширина спектра по порядку величины совпадает с шириной спектра хаотической генерации ЛОВ с квазинепрерывной электронной инжекцией [6-9]. Такое совпадение объясняется тем, что в хаотическом режиме излучение представляет собой случайную последовательность импульсов, идентичных по своей природе рассмотренным выше. При этом если в режиме моноимпульсной генерации спектр излучения гладкий, то в хаотическом режиме он сильно изрезан.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 95-02-04791, а также при поддержке Комиссии ЕС-DG-III/ESPRIT — проект ACTCS 9282.

Список литературы

- [1] *Bonifacio R., Maroli C., Piovella N.* // Opt. Comm. 1988. V. 68. N 5. P. 364-368.
- [2] *Гинзбург Н.С.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 5. С. 440-443.
- [3] *Гинзбург Н.С., Сергеев А.С.* // ЖЭТФ. 1991. Т. 99. В. 2. С. 438-446.
- [4] *Ильинский Ю.А., Маслова Н.С.* // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 1. С. 171-174.
- [5] *Вайнштейн Л.А., Клеев А.И.* // ДАН СССР. 1990. Т. 311. С. 862-870.
- [6] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037-1052.
- [7] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П.* // Релятивистская высокочастотная электроника. В. 2. Горький: ИПФ СССР, 1981. С. 101.
- [8] *Электроника ламп с обратной волной* / Под ред. В.Н. Шевчика и Д.И. Трубецкого. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. Гл. 3.
- [9] *Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. В. 3. С. 180-184.

Институт прикладной
физики РАН
Н. Новгород

Поступило в Редакцию
12 марта 1996 г.