

УДК 621.039.56; 621.385

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕРЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ СГУСТКАМИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

**С.С. Геращенко, В.И. Гриценко, В.И. Муратов, В.Д. Федорченко**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, физико-технический факультет  
пл. Свободы 4, Харьков, Украина, 61022*

Received 12 November 2012

В работе экспериментально исследуется переходное электромагнитное излучение когерентными нерелятивистскими электронными сгустками на различных электродинамических неоднородностях. Показано, что существенное влияние на спектры переходного излучения оказывает быстрота перестройки направления движения электронов проводимости, которая происходит при пролете через диафрагмы. Для увеличения мощности переходного излучения использовались спиральные структуры. Для совмещенного электрического и магнитного диполя средняя мощность более чем на порядок превышала среднюю мощность на системе диафрагм.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электронный сгусток, переходное излучение, диафрагма, спираль, электромагнитный импульс.

### EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSITION RADIATION BY NONRELATIVISTIC ELECTRON BUNCHES ON DIFFERENT ELECTRODYNAMIC HETEROGENEITIES

**S.S. Geraschenko, V.I. Gritsenko, V.I. Muratov, V.D. Fedorchenko**

*Kharkov National University named by V.N. Karazin, Department of Physics and Technology  
Svobody sq., 4, Kharkov, Ukraine, 61108*

Electromagnetic transition radiation by coherent nonrelativistic electron bunches on different electrodynamic heterogeneities are experimentally studied in the paper. It was shown that transition radiation spectra considerably effected by rapidity of reorientation of conduction electron movement direction, which can be observed during passage of bunches through diaphragms. Spiral structures were used to enlarge power of transition radiation. The average power for superposed electric and magnetic dipoles more than 10 times exceeded the average power on the system of diaphragms.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** electron bunch, transition radiation, diaphragm, spiral, electromagnetic pulse.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕРЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ЗГУСТКАМИ НА РІЗНИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ НЕОДНОРІДНОСТЯХ

**С.С. Геращенко, В.І. Гриценко, В.І. Муратов, В.Д. Федорченко**

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
фізико-технічний факультет, пл. Свободи, 4 Харків, 61022*

У роботі експериментально досліджується перехідне електромагнітне випромінювання когерентними нерелятивістськими електронними згустками на різних електродинамічних неоднорідностях. Показано, що істотний вплив на спектри перехідного випромінювання надає прудкість перебудови напряму руху електронів провідності, яка відбувається при прольоті через діафрагми. Для збільшення потужності перехідного випромінювання використовувалися спіральні структури. Для поєднаного електричного і магнітного диполя середня потужність більш ніж на порядок перевищувала середню потужність на системі діафрагм.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електронний згусток, перехідне випромінювання, діафрагма, спіраль, електромагнітний імпульс.

Как хорошо известно, электромагнитное излучение (ЭМИ), генерируемое заряженными частицами, возможно не только при их ускоренном движении, но и при движении этих частиц с постоянной скоростью. Существенным условием возникновения излучения электромагнитных волн в этом случае является наличие материальных сред. Если заряженная частица движется прямолинейно и равномерно вблизи проводящей среды или влетает в нее, то она возбуждает в этой среде токи, изменяющиеся со временем. Наводимые токи порождают электромагнитное излучение. Движение с постоянной скоростью вблизи диэлектриков приводит к их локальной поляризации во времени и пространстве и, соответственно, к излучению электромагнитных волн, но уже с гораздо меньшими интенсивностями. Таким образом, электромагнитное излучение связано с перестройкой поля системы “заряженная частица - среда” [1 - 5].

В настоящее время большой интерес представляет создание мощных ЭМИ малой длительности. Одним из механизмов, на базе которого осуществляется излучение ЭМИ, является его генерация с помощью быстрой перестройки поля, происходящей в системе “заряженный сгусток электронов – проводящее твердое тело”, т.е. с помощью генерации переходного излучения (ПИ). Широкополосное переходное излучение планируется использовать в импульсной радиолокации и системах связи.

Основными задачами в данной работе являлись:

- 1) управление спектрами переходного излучения с использованием различных электродинамических структур;

- 2) исследование механизма переходного излучения на ограниченных электродинамических структурах;
- 3) исследование возможностей увеличения мощности электромагнитного излучения и уменьшения ширины электромагнитных импульсов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент проводился на установке, схематически изображенной на рис. 1. Через металлическую трубу диаметром 9 см, расположенную в однородном магнитном поле 400 Э, инжектируются два взаимопроникающих пучка электронов. Эмиттером первого пучка является таблетка гексаборида лантана диаметром 0,6 см, второго – танталовая спираль, пронизываемая электронами первого пучка. Скорости пучков составляют  $3,3 \cdot 10^9$  и  $3,6 \cdot 10^9$  см/сек. Суммарный ток 40 – 50 мА. Рабочее давление в камере  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр.

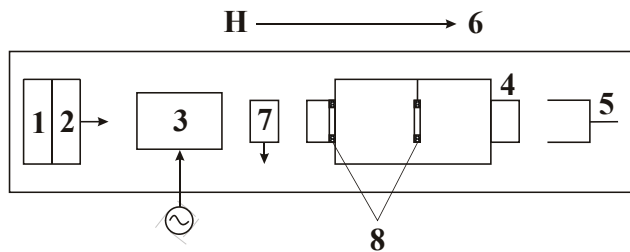


Рис 1. Блок-схема экспериментальной установки:  
1, 2 – электронные пушки; 3 – модулятор; 4 – резонатор;  
5 – коллектор; 6 – катушки магнитного поля; 7 – емкостный зонд; 8 – диафрагма.

В отсутствие модулирующего сигнала система двух электронных пучков была устойчивой, так как инжектировались в закритическом режиме [6,7]. Подача сигнала конечной амплитуды переводит систему в неустойчивое состояние. При этом наблюдался экспоненциальный рост неустойчивой волны по мере увеличения расстояния модулятор – зонд. Фазовая скорость, измеренная при различных скоростях пучков и частотах модуляции, составляла  $(3 \div 4) \cdot 10^9$  см/сек. При достижении определенной амплитуды волна захватывала электронные пучки и формировалась нелинейная волна Бернштейна-Грина-Крускала, после чего измерение фазовой скорости становилось невозможным. Оценка амплитуд захвата проводилась по формуле:

$$\varphi_0 \geq \frac{m}{2e} (v_b - v_\phi)^2,$$

где  $v_b$  - скорость пучка,  $v_\phi$  - фазовая скорость волны,  $m$  и  $e$  - масса и заряд электрона. При различных энергиях пучков и частотах модуляции  $\varphi_0 \sim 10 - 15$  В.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При определенном соотношении скоростей и токов пучков, т.е. при оптимальной функции распределения захваченных частиц емкостной зонд фиксирует широкополосный сигнал. Исследование гармонического состава этого сигнала проведено для различных частот модуляции. Анализатором спектра измерялись относительные амплитуды восьми гармоник. Затем была проведена калибровка высокочастотного тракта с помощью стандартных генераторов. Решая обратную задачу Фурье, можно определить форму потенциала сгустка, которая имеет вид узкого импульсов. Следует отметить, что при увеличении частоты модуляции полуширина импульса уменьшается. Так при частоте модуляции 670 МГц она составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-10}$  сек, при частоте модуляции 925 МГц -  $10^{-10}$  сек.

Зная скорость сгустка, можно оценить его продольный размер, который составляет 0,3 см. Поперечный размер определяется диаметром катода и равен 0,6 см. Плотность частиц в сгустке  $10^8$  см<sup>-3</sup>, а полное число частиц  $N = 4 \cdot 10^7$  [8].

Для проверки равновесия сгустков проводился следующий эксперимент. Вместо зонда был поставлен объемный резонатор, который мог перемещаться вдоль длины системы. Патрубок резонатора был затянут сеткой. Резонатор служил для диагностики переходного электромагнитного излучения, генерируемого сгустком на сетке. При этом резонатор возбуждался на собственных частотах, которые являются гармониками частоты модуляции. На частоте модуляции 1220 МГц была измерена амплитуда пятой гармоники в зависимости от расстояния модулятор – резонатор (рис. 2).

Видно, что при расстоянии  $l < 12,5$  см возбуждение резонатора отсутствует, далее амплитуда гармоники возрастает и остается постоянной. Это означает, что после того как сгусток сформировался, он остается в равновесии на большой длине пролета ( $\sim 30$  см).

При пролете сгустка через различные электродинамические неоднородности генерируется

широкополосное переходное излучение.

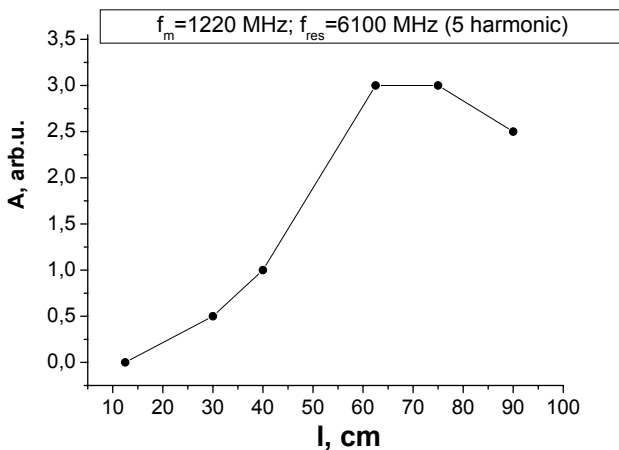


Рис. 2. Зависимость амплитуды 5<sup>ой</sup> гармоника ( $f_{mod} = 1220$  МГц) от расстояния модулятор – резонатор.

пучка 0,3 см. Измерения проводились на нижней моде с частотой 6,38 ГГц. Из рис.3 видно, что амплитуда излучения максимальна при радиусе отверстия близком к радиусу пучка и уменьшается с увеличением радиуса отверстия.

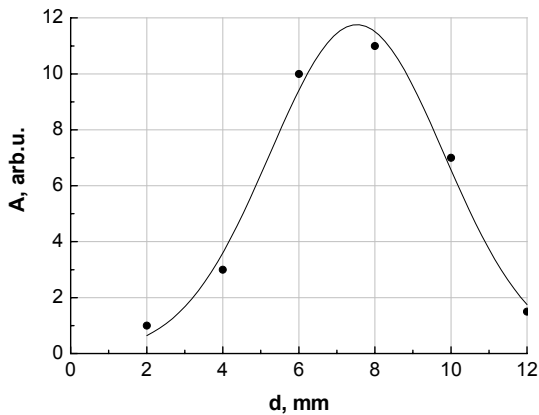


Рис. 3. Зависимость интенсивности амплитуды излучения от радиуса отверстия диафрагмы

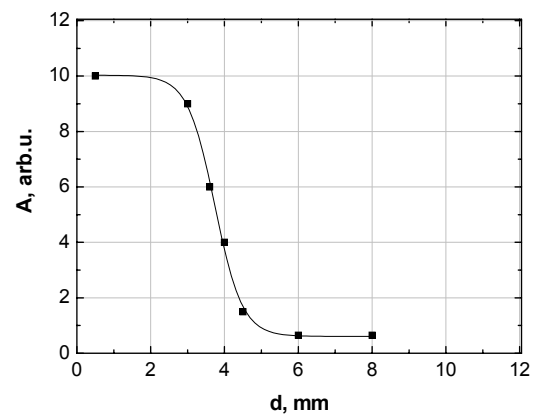


Рис. 4. Зависимость амплитуды излучения от толщины диафрагмы

Зависимость амплитуды излучения при оптимальном радиусе отверстия от толщины диафрагмы представлена на рис.4. Амплитуда переходного излучения резко спадает при увеличении толщины диафрагмы, практически исчезая при толщине сравнимой с её диаметром.

Спектры излучения для тонкой ( $d = 0,2$  см) и толстой (0,6 см) диафрагм показаны на рис.5, из которого видно, что на тонкой диафрагме спектра расширяется до 30 ГГц, в то время как на толстой ограничивается 14 ГГц.

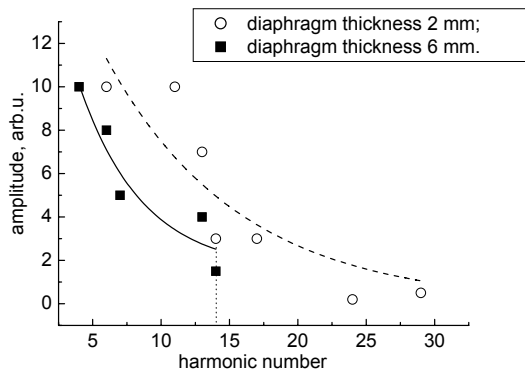


Рис.5. Спектры излучения для тонкой и толстой диафрагм

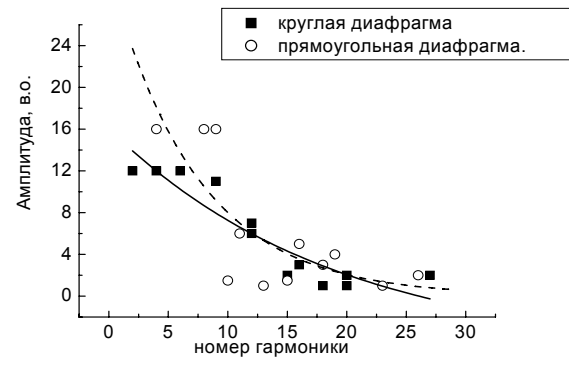


Рис.6. Спектры излучения на круглой и прямоугольной диафрагмах

На частоте модуляции 965 МГц были измерены спектры на круглой и прямоугольной диафрагмах одинаковой площади и толщины (рис.6). В частотном диапазоне до 7,5 ГГц амплитуда на прямоугольной

Переходя к экспериментам на диафрагмах [9], следует заметить, что на интенсивность и ширину спектра излучения большое влияние оказывает материал, из которого изготовлена диафрагма. Сравнение для двух геометрически идентичных медной и керамической диафрагм показывает, что спектр на керамической диафрагме ограничен наименьшей собственной частотой резонатора и интенсивность на медной диафрагме на два порядка больше, чем на керамической. Измерение спектров на диафрагме из ниобий – титанового сплава показывает, что они близки к спектрам на медной диафрагме.

Диафрагма располагалась как в центре, так и на входе резонатора. Для последнего случая исследовалась зависимость интенсивности излучения от радиуса отверстия тонкой ( $d = 0,2$  см) диафрагмы при неизменном радиусе









