

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.

KEY WORDS: electron bunch, transition radiation, diaphragm, spiral, electromagnetic pulse.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕРЕЛЯТИВІСТСКИМИ 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 поєданого 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.

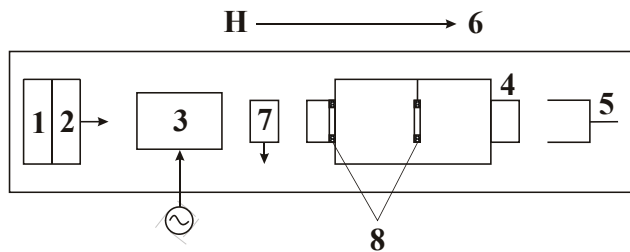


Рис 1. Блок-схема экспериментальной установки:
1, 2 – электронные пушки; 3 – модулятор; 4 – резонатор;
5 – коллектор; 6 – катушки магнитного поля; 7 – емкостный зонд; 8 – диафрагма.

Начальное возмущение создается подачей от внешнего генератора высокочастотного напряжения на модулятор (3, рис. 1), представляющей собой замедляющую спираль длиной 15 см, связанную с генератором через дополнительную спираль с обратной намоткой. Модулирующее напряжение на частотах 0,5 – 1,2 ГГц подается от генератора Г4 – 37 мощностью 1 ватт. За модулятором располагаются емкостной зонд (7, рис 1) и цилиндрический объемный резонатор (4, рис. 1) диаметром 3,5 см и длиной 6,8 см, с помощью которых измерялись частоты и мощность излучения.

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_ϕ – 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⁻³, 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 (~ 30 см).

При пролете сгустка через различные электродинамические неоднородности генерируется

широкополосное переходное излучение.

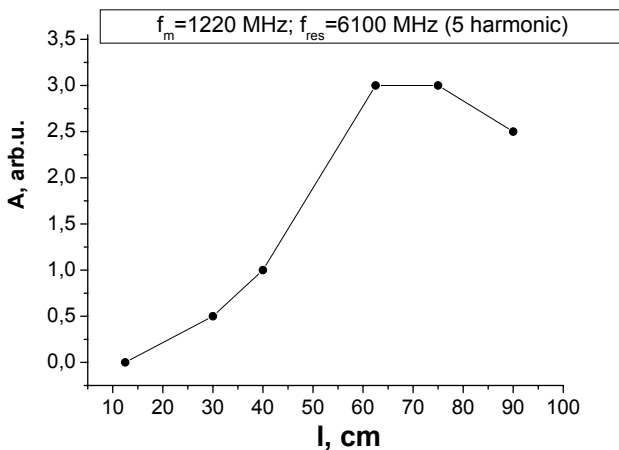


Рис. 2. Зависимость амплитуды 5^{ой} гармоника ($f_{mod} = 1220$ МГц) от расстояния модулятор – резонатор.

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.

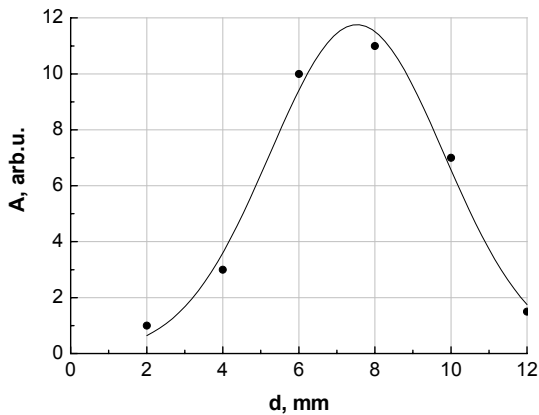


Рис. 3. Зависимость интенсивности амплитуды излучения от радиуса отверстия диафрагмы

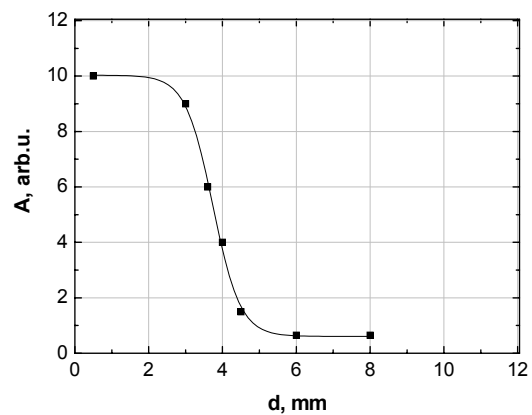


Рис. 4. Зависимость амплитуды излучения от толщины диафрагмы

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.

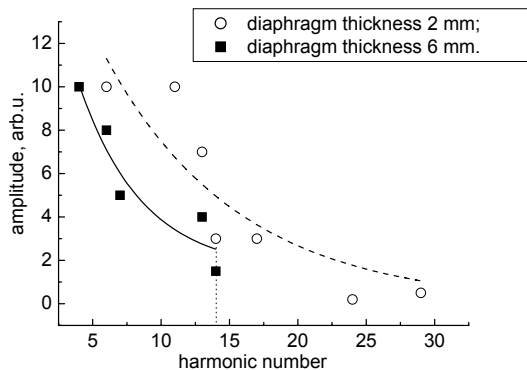


Рис.5. Спектры излучения для тонкой и толстой диафрагм

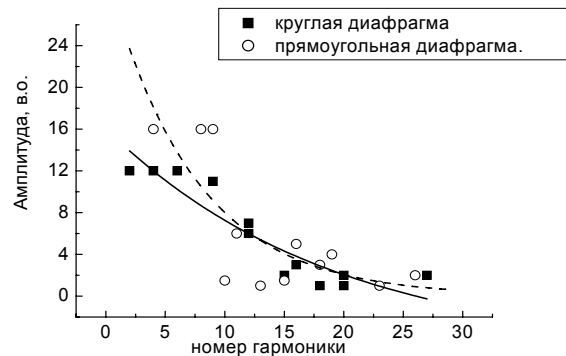


Рис.6. Спектры излучения на круглой и прямоугольной диафрагмах

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

диафрагме больше, чем на круглой. Высоочастотная часть спектра практически совпадает для обеих диафрагм.

Несомненный интерес вызывает использование в качестве антенн – излучателей фрактальных диафрагм. Известно, что спектр переходного излучения при прохождении электронных сгустков через фрактальную электродинамическую систему, имеет самоподобную широкодиапазонную структуру. Получаемые при этом сигналы с фрактальными спектрами являются помехозащищенными и их можно использовать при решении проблем широкополосной локации и создания широкополосных систем связи.

В эксперименте были измерены спектры на прямоугольной медной диафрагме и ковре Серпинского (рис.7). Сравнивая спектры, можно сказать, что на ковре Серпинского наблюдается увеличение высоочастотных составляющих спектра переходного излучения и увеличение амплитуд в диапазоне 10–30 ГГц.

В одинаковых экспериментальных условиях были измерены также спектры на обычной круглой и модифицированной диафрагмах (рис.8 и 9). Спектр на фрактальной диафрагме расширяется в сторону высоких частот. К сожалению, удалось измерить только огибающую фрактального спектра, так как для исследования тонкой структуры необходим анализатор спектра с разрешением $\sim 0,1$ кГц.

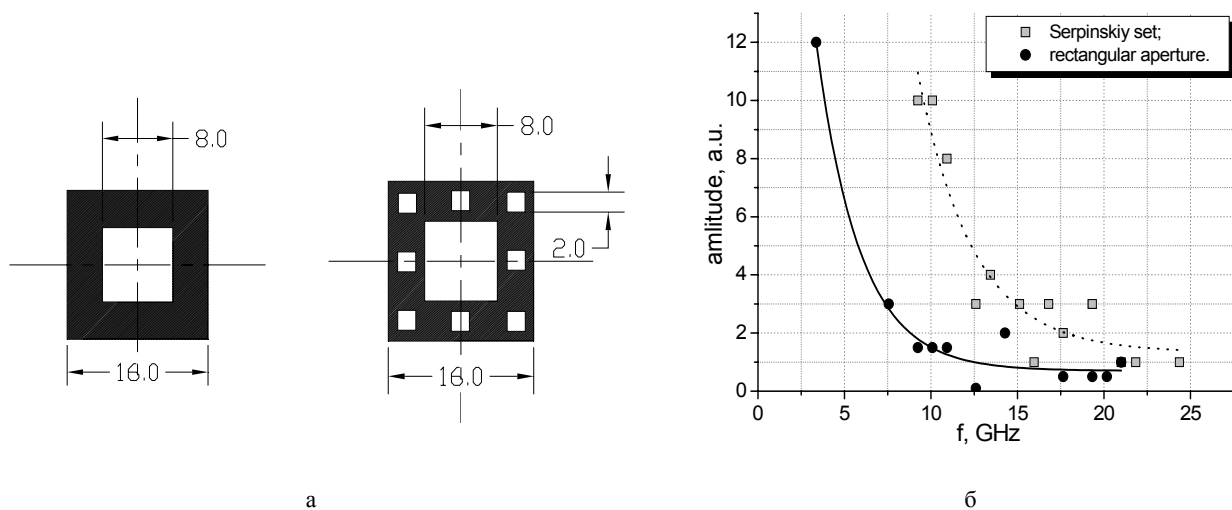


Рис.7. Спектры переходного излучения на прямоугольной медной диафрагме и ковре Серпинского:
а – диафрагмы; б – спектры.

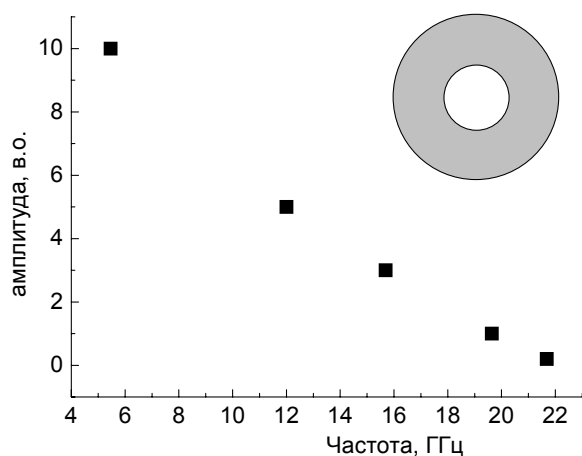


Рис.8. Спектр излучения на круглой диафрагме с отверстием.

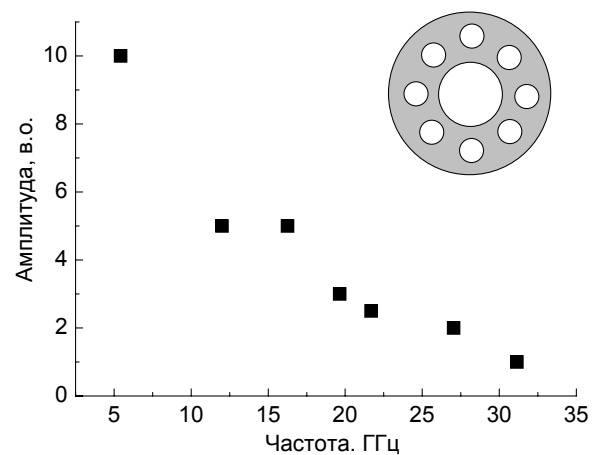


Рис.9. Спектр излучения на модифицированной диафрагме.

Таким образом, используя диафрагмы различных материалов, геометрий, можно управлять спектрами переходного излучения.

Экспериментально обнаружено увеличение мощности переходного излучения и существенную перестройку спектра при использовании комбинации диафрагм, расположенных на определенном расстоянии одна от другой в резонаторе. Это видно из рис.10, где приведены спектры излучения с одной диафрагмы (кривая 1) и с двух идентичных диафрагм, расположенных на расстоянии 3 мм одна от другой (кривая 2).

В одинаковых условиях эксперимента спектр на двух диафрагмах расширяется в сторону высоких частот и излучение имеет большую интенсивность по сравнению с одной диафрагмой.

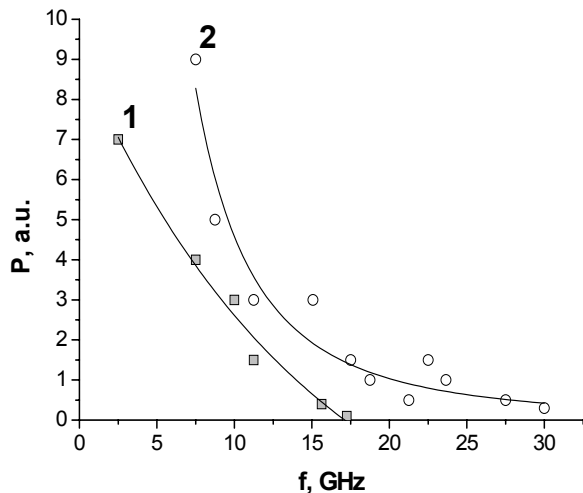


Рис.10. Спектры переходного излучения: 1 – для одной диафрагмы; 2 – для 2^х диафрагм.

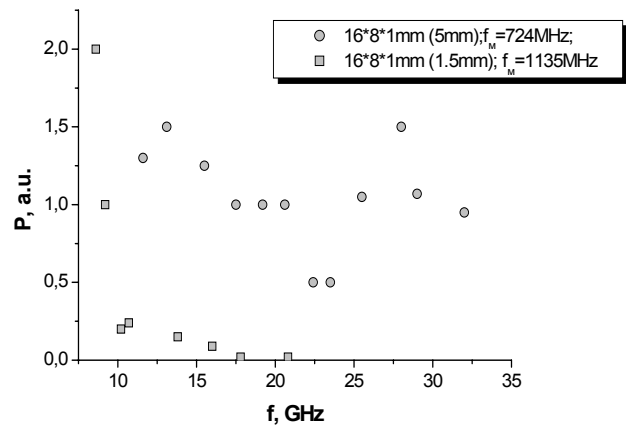


Рис.11. Спектры двух идентичных диафрагм, расположенных на расстоянии 1,5 мм и 5 мм одна от другой.

Оптимальным между диафрагмами является расстояние, сравнимое с продольным размером электронного сгустка. Длиной сгустка можно управлять частотой модуляции, так как последняя при постоянной скорости сгустка меняет время его пребывания между диафрагмами. На рис. 11 представлены спектры, измеренные на двух идентичных диафрагмах, расположенных на расстояниях 1,5 мм и 5 мм одна от другой.

В первом случае продольный размер сгустка больше зазора между диафрагмами, во втором – они близки друг к другу. Если продольный размер сгустка близок к расстоянию между диафрагмами, спектр расширяется до 32 ГГц и интенсивность излучения на высоких частотах увеличивается больше, чем на порядок.

Если сгусток электронов пролетает через две диафрагмы, то большое влияние на спектры переходного излучения имеет положение точек заземления каждой из диафрагм.

На рис.12 приведены две характерные возможности заземления диафрагм.

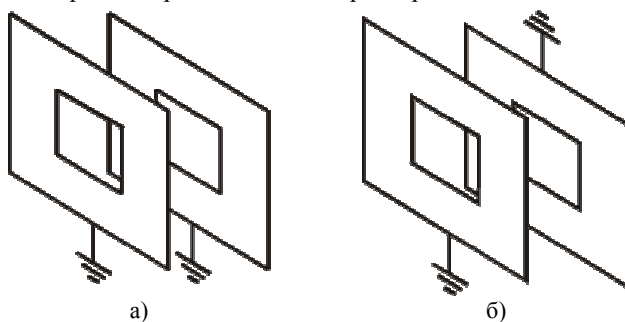


Рис.12. Квадратные диафрагмы
а) одностороннее заземление, б) разностороннее заземление.

Если диафрагмы заземлены в разных направлениях (рис.12б), то токи в диафрагмах при пролете сгустка электронов между ними складываются. Эти изменения в поведении суммарной плотности токов электронов проводимости для разных случаев заземления диафрагм существенным образом влияют на характеристики спектров переходного излучения (рис.13).

Для понимания роли наведенных сгустком токов проводимости был поставлен эксперимент на прямоугольной медной диафрагме, которая в одном случае была заземлена, а в другом – изолирована от земли.

Сравнительные спектры излучения приведены на рис. 14. Видно, что на изолированной диафрагме спектр практически отсутствует за исключением трех низких частот малой амплитуды.

Кроме спектров, на двух диафрагмах, расположенных на оптимальном расстоянии одна от другой в резонаторе, термистерным мостом Я2М-64 измерялась средняя мощность излучения. Измерительной антенной служила цилиндрическая спираль, также расположенная в резонаторе на расстоянии 10 мм от диафрагм. Чтобы спираль не “чувствовала” сгустка в середине её поставлена медная трубка 10×8 (мм) длиной 25 мм на расстоянии 8 мм от диафрагм. Измеренная таким образом средняя мощность на двух диафрагмах составила 15 мВт, на одной диафрагме – 1 мВт. Если убрать обе диафрагмы, сигнал с измерительной антенны отсутствовал.

Дальнейшие эксперименты были направлены на поиски более эффективных, чем диафрагмы, антенно-излучателей на базе других электродинамических структур. Исследовались широкополосные конусные спирали, цилиндрические спирали с различными длиной, шагом и внутренним диаметром, а также решетка,

Рассмотрим случай, когда диафрагмы заземлены в одну сторону (рис.12а). В этом случае влетающий в двойную систему сгусток электронов порождает движение электронов проводимости в направлении заземления сначала в первой диафрагме. При вылете сгустка электронов из первой диафрагмы в ней поверхностный ток проводимости изменяет свое направление движения на противоположное. В то же самое время во второй диафрагме ток электронов проводимости начал свое движение в направлении заземления. Таким образом, при пролете сгустка электронов между диафрагмами токи в диафрагмах компенсируют друг друга.

свернутая в окружность. Измерения проводились как в резонаторе так и в вакуумной камере, где спирали размещались либо в металлических кожухах, либо без них.

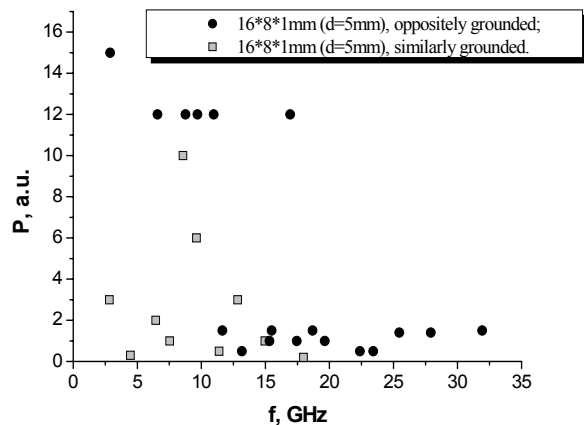


Рис.13.Спектры переходного излучения при заземлениях, изображенных на рис. 12.

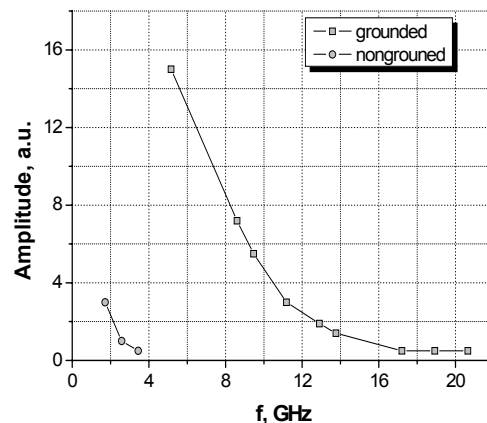


Рис.14. Спектры переходного излучения для изолированной и заземленной диафрагм.

Конусная спираль длиной 50 мм и шагом 10 мм располагалась в резонаторе из нержавеющей стали. Излучение с крайнего витка подавалось на ваттметр и анализатор спектра. Измерение средней мощности дало значение 150 мВт, что на порядок превышает мощность от двух диафрагм, спектр показан на рис. 15.

Аналогичные результаты (средняя мощность 150 мВт и похожие спектры) получены на двухзаходной спирали и решетке свернутой в окружность диаметром 20 мм так, чтобы сгусток пересекал витки. Если сгусток движется вдоль витков решетки, мощность излучения существенно уменьшается (до 10 мВт).

Остановимся подробнее на эксперименте с цилиндрическими спиралями. При постоянном внутреннем диаметре кожуха (47 мм) и диаметре сгустка (6 мм) были измерены средняя мощность и спектр излучения на спиралях, отличающихся только внутренним диаметром намотки (шаг 5 мм, длина 35 мм). Из рис. 16 видно, что излучаемая мощность на спиралях диаметром 12 и 21 мм одна и та же, вдвое уменьшается при диаметре 25 мм и практически равна нулю на диаметре 30 мм.

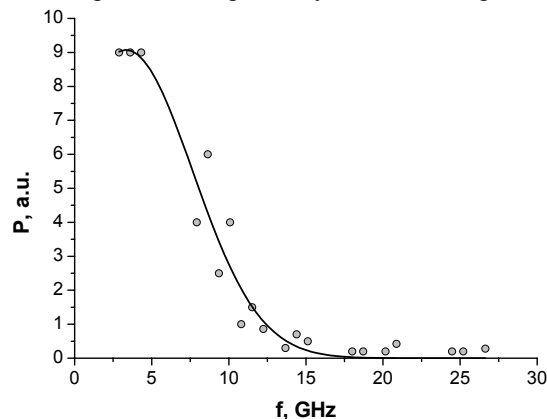


Рис.15. Спектр переходного излучения от внутреннего диаметра спирали.

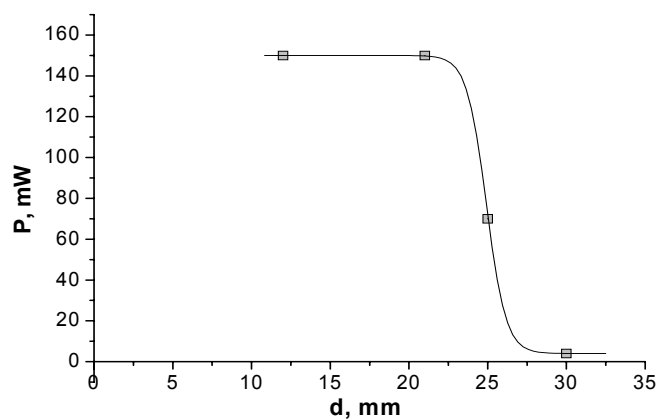


Рис.16. Зависимость мощности переходного излучения от внутреннего диаметра спирали.

Спектры в первых трех случаях содержат большое число гармоник частоты модуляции, в последнем – спектр практически отсутствует. Требовалось выяснить, с чем связано уменьшение мощности: с удалением спирали от сгустка или приближением её к кожуху. С этой целью спираль с внутренним диаметром 20 мм располагалась в кожухе 30 мм. Измеренная мощность увеличилась вдвое и составила 300 мВт.

В следующем эксперименте та же спираль помещена в медный резонатор с внутренним диаметром 35 мм. Средняя мощность возросла до 500 мВт, что связано с уменьшением потерь в торце.

Отсюда можно сделать вывод: с одной стороны, для увеличения генерируемой мощности необходимо оптимальное соотношение между радиусом сгустка и спирали (то же самое имело место в случае диафрагм), с другой – необходимо оптимальное удаление спирали от кожуха.

Экспериментально изучался высокочастотный трансформатор, вторичная обмотка которого – постоянная спираль диаметром 35 мм, шагом 5 мм и длиной 45 мм (35×5×45). С конечного витка этой спирали измерялась средняя мощность, генерируемая сгустком в изолированной первичной обмотке. Первичная обмотка – спирали с одинаковым диаметром (20 мм) и шагом (5 мм) и разной длиной l (12, 15, 25, 30 и 45 мм). Оказалось, что максимальная мощность равная 750 мВт, генерируется в том случае, когда первичной обмоткой является

спираль $20 \times 5 \times 15$ (3 витка) (рис. 17).

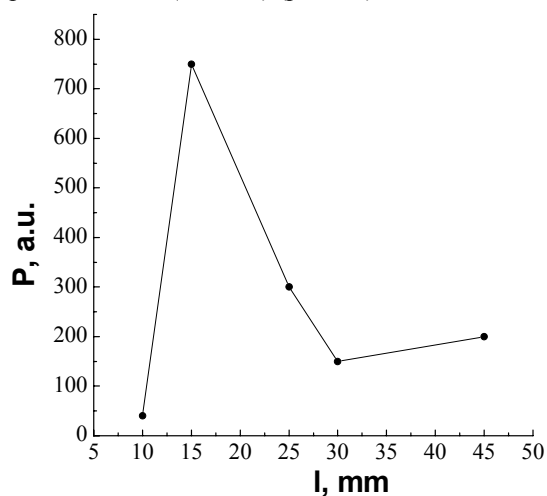


Рис. 17. Зависимость мощности переходного излучения от длины спирали в первичной обмотке.

образом, эта спираль является совмещенным электрическим и магнитным диполем. Чтобы убедиться в этом был поставлен следующий эксперимент. В системе поставлена изолированная спираль $20 \times 5 \times 15$. Электрическим и магнитным зондами были измерены распределения полей вдоль длины спирали. В центре спирали наблюдается максимум магнитного поля и нуль электрического, которое в противофазе возрастает к конечным точкам спирали. Измеренный на этой спирали спектр переходного излучения представлен на рис.18.

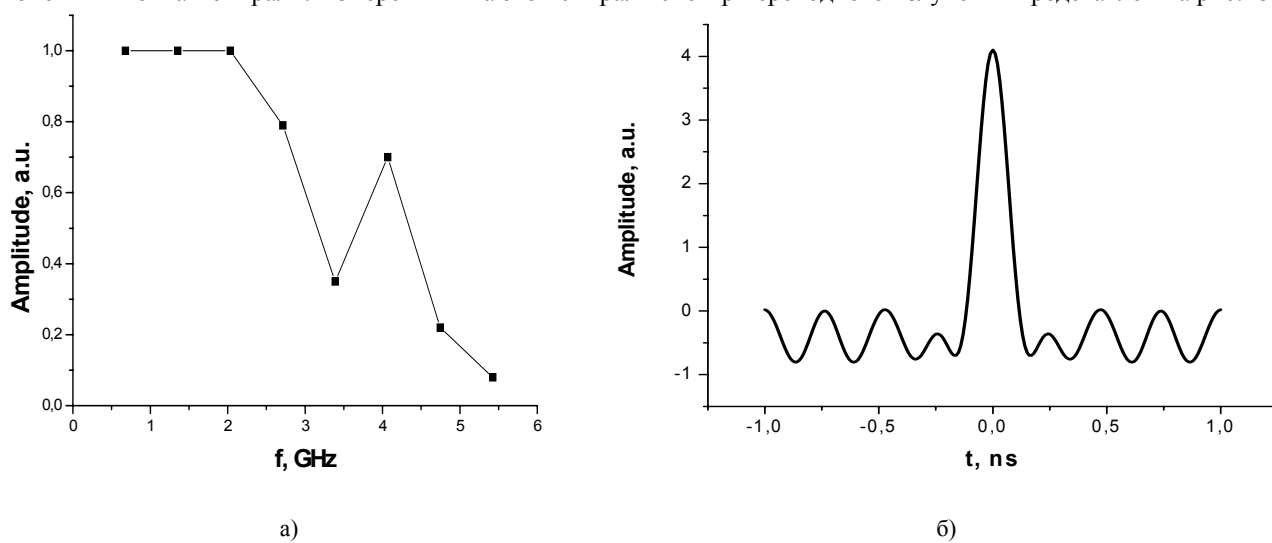


Рис.18. Спектр переходного излучения
а) - спектр с диполя; б) - форма электромагнитного импульса.

ВЫВОДЫ

1. Существенное влияние на спектры переходного излучения оказывает быстрота перестройки направления движения электронов проводимости, которая происходит при пролете электронных сгустков через диафрагмы. Это означает, что с помощью материалов диафрагм и их геометрий можно управлять спектром переходного излучения. Расположение точек заземления диафрагм влияет на направление движения наведенных токов и, следовательно, на диаграмму направленности переходного излучения.
2. Для значительного увеличения интенсивности переходного излучения использовались спиральные электродинамические структуры. Для совмещенного электрического и магнитного диполя измеренная средняя мощность составляла 700 – 800 мВт, что более чем на порядок превышает среднюю мощность на системе диафрагм.
3. Уменьшение ширины электромагнитного импульса достигалось увеличением частоты модуляции. Кроме того, проведены предварительные эксперименты, показывающие, что ширину импульса можно значительно уменьшить, увеличивая высокочастотное напряжение, модулирующее электронные пучки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ginzburg V.L., Frank I.M. Izluchenie ravnomerno dvizhushchegosya elektrona, vznikayushchee pri ego perekhode iz odnoy sredy v druguyu // Zhurn. eksp. i. teor. fiziki. – 1946.-T.16, №1.– S.15-28.
2. Ginzburg V.L. Teoreticheskaya fizika i astrofizika. –Moskva: Nauka, 1987. –488s.
3. Ginzburg V.L., Tsytoich V.N. Perekhodnoe izluchenie i perekhodnoe rasseyanie. –Moskva: Nauka, 1984. –360s.
4. Ter-Mikaelyan M.L. Vliyanie sredy na elektromagnitnye protsessy pri vysokikh energiakh. – Erevan: Izd. AN Arm. SSR, 1969. –456s.
5. Kalmykova S.S., Kurilko V.I. Fizicheskie mekhanizmy kolektivnykh perekhodnykh neustoychivostey potokov zaryazhennykh chastits. –Kiev: Nauk. Dumka, 1989. –S.162-175.
6. Fedorchenko V.D., Mazalov Yu.P., Bakay A.S. Upravlenie profitem potentsial'nykh voln v mnogopotokovykh plazmennykh sistemakh // ZhETF. – 1979. – T.76. – S.107.
7. Bakay A.S., Krivyulya S.S., Fedorchenko V.D., Muratov V.I. // Vozbuzhdenie voln v ogranichennoy plazme puchkom elektronov s zakriticheskoy skorost'yu // Pis'ma v ZhETF.-1975.-T. 21.-S. 226.
8. Bolotov V.N., Kononenko S.I., Muratov V.I., Fedorchenko V.D. Generation of non-relativistic electron bunches and measurement of their basic parameters // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. –2008. – Vol.A596. – P. 285-287.
9. Bolotov V.N., Kononenko S.I., Muratov V.I., Fedorchenko V.D. Perekhodnoe izluchenie nerelyativistskikh elektronnykh sgustkov na diafragmakh // ZhTF. –2004. -T.74. -Vyp. 4. - S. 89 – 94.