

Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, С. С. Пономаренко

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ СГУСТКАМИ, ПАДАЮЩИМИ НА ПРОВОЛОЧНЫЙ ЭКРАН

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: yefimov@ire.kharkov.ua*

Приведены экспериментальные результаты изучения свойств переходного излучения, которое возбуждено электронным потоком, рассеянным на периодических неоднородностях в виде проволочной периодической структуры. Описан модулятор (генератор электронных сгустков), созданный на основе резонансной лампы обратной волны 8-мм диапазона длин волн. Показано, что распределение потока энергии и интенсивность переходного излучения качественно совпадают с результатами теоретических расчетов. Ил. 11. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: модулированный электронный поток, лампа обратной волны, двоякая замедляющая система типа плоской гребенки, проволочный экран, переходное излучение.

Современный научно-технический прогресс в области развития СВЧ-техники во многом зависит от развития исследований, касающихся физики явлений, которые могли бы служить основой для модернизации существующих или создания новых приборов и устройств.

Переходное излучение отдельной заряженной частицы принадлежит к числу фундаментальных элементарных эффектов излучения [1]. С момента теоретического предсказания В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком в 1946 г. возможности излучения равномерно движущегося электрона при переходе из одной среды в другую опубликовано большое число работ, в которых с разных сторон раскрываются свойства этого явления [2].

В настоящее время интерес к переходному излучению вызван тем, что этот эффект имеет целый ряд важных применений (например, возможность генерации мощных коротких электромагнитных импульсов, возникающих при бомбардировке электронными сгустками твердых мишеней). Переходное излучение используется для исследования свойств двумерных электронных слоев, которые являются физической основой устройств современной электроники. Переходное излучение модулированных электронных потоков, пересекающих границу плазмopodobной среды, является эффективным способом генерации поверхностных электромагнитных волн [3, 4].

Известно, что повышение сопротивления переходного излучения обуславливает эффективность его использования в СВЧ-диапазоне. При использовании неоднородностей сопротивление излучения по сравнению с сопротивлением переходного излучения, возникающего при падении электронного пучка на неограниченную плоскость, возрастает [5].

В Институте радиофизики и электроники г. Харькова выполнен ряд работ, посвященных исследованию полей рассеяния как отдельных

заряженных частиц, так и сгруппированных электронных пучков на металлических неоднородностях. Здесь наибольшее внимание заслуживает работа [6], в которой показано, что сопротивление излучения существенно зависит от характера неоднородности, ее формы и размеров.

В настоящей работе экспериментально исследуются поток энергии и токовые характеристики переходного излучения, сформированного полем электронных сгустков, которые рассеяны на периодических неоднородностях в виде проволочного экрана. Подробно рассматривается взаимно перпендикулярная ориентация сгустков электронного потока и проволоки экрана; описан модулятор (генератор электронных сгустков), созданный на основе резонансной лампы обратной волны (ЛОВ) 8-мм диапазона волн. Также обсуждаются возможные варианты оптимизации методики экспериментальных исследований. Полученные результаты сравниваются с теоретическими расчетами, изложенными в работе [3].

1. Постановка задачи и описание экспериментальной установки. В работе [3] теоретически было исследовано переходное излучение модулированного электронного потока при его прохождении через проволочный экран. Электронный поток в виде бесконечной периодической последовательности отдельных сгустков движется вдоль нормали к экрану. Проволочный экран расположен в вакууме и представляет собой набор параллельных металлических проволок. Диаметр проволок и расстояние между соседними проволоками намного меньше длины волны излучения λ .

В настоящей работе рассматривается случай перпендикулярной ориентации сгустков и проволок. Теоретический расчет потока энергии для такого случая детально изложен в вышеуказанной теоретической работе, поэтому мы не будем подробно останавливаться на нем. Полу-

ченные в результате расчета угловые зависимости потока энергии переходного излучения представлены на рис. 1.

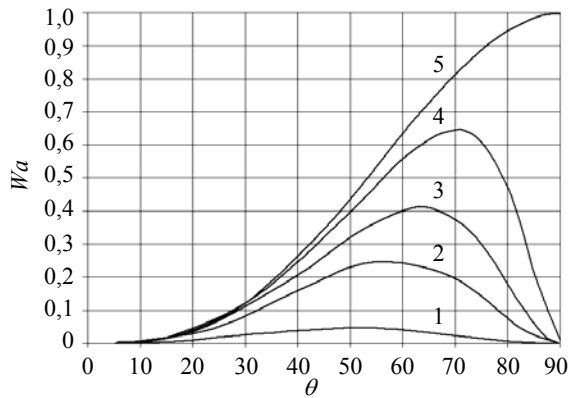


Рис. 1. Поток энергии переходного излучения для ряда значений угла φ : 1 – $\varphi = 30^\circ$; 2 – $\varphi = 60^\circ$; 3 – $\varphi = 70^\circ$; 4 – $\varphi = 80^\circ$; 5 – $\varphi = 90^\circ$

В указанной работе также показано, что при $\varphi \rightarrow 0$ поток энергии переходного излучения стремится к нулю, а наибольшее значение потока энергии наблюдается при $\varphi = \theta = 90^\circ$.

Обычно в эксперименте для модуляции электронных пучков используют клистронные резонаторы, однако в мм диапазоне волн использовать клистронные резонаторы для модуляции электронных потоков возможно только для пучков с ограниченными поперечными размерами и малой плотностью тока в пучке, что, естественно, ограничивает возможности эксперимента и достоверность его результатов. Поскольку стало ясно, что устройства с локальным взаимодействием типа клистронных тороидальных резонаторов бесперспективны, основное внимание было сконцентрировано на группирователях с каскадным взаимодействием электронов в поле электромагнитной волны, таких как лампа бегущей волны (ЛБВ) и ЛОВ. Их электродинамические системы типа решеток, гребенок, цилиндрических резонаторов позволяют рассеивать значительные уровни мощности электронных пучков. Эти системы являются основой для построения электровакуумных приборов средней и большой мощностей в мм диапазоне длин волн. Такие генераторы созданы на основе ЛОВ с наклонным электронным пучком (клинотроны). Для создания электронного модулятора был выбран именно этот класс приборов с несколько иной модификацией исполнения: для осуществления полного прохождения электронного пучка через пространство взаимодействия ЛОВ в реальной конструкции прибора была использована схема сдвоенных плоских гребенок. Примененная схема позволила избежать клинотронного эффекта, всегда присутствующего при использовании в приборе только

одной замедляющей системы. Схематически конструкция такого прибора приведена на рис. 2.

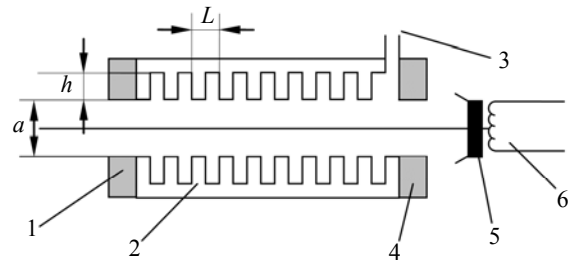


Рис. 2. Макет модулятора электронного потока на ЛОВ: 1 – запердельный волновод для волны 8-мм диапазона; 2 – сдвоенная периодическая гребенчатая структура; 3 – вывод СВЧ-энергии; 4 – анод лампы; 5 – катод с фокусирующим электродом; 6 – подогреватель

Для замедления электромагнитной волны используется модулятор, основанный на замедляющей системе типа сдвоенная гребенка (рис. 2). Замедляющая система создана с коэффициентом замедления, обеспечивающим скорость распространения волны близкой к 0,1 с, что соответствует ускоряющему напряжению близкому к 3 кВ.

Дисперсионное уравнение для замедляющих систем типа сдвоенных плоских гребенок можно получить электродинамическим методом частичных областей путем сшивания полей в трех областях, показанных на рис. 2, т. е. в зазоре между гребенками и в их щелях.

Электродинамический метод частичных областей широко используется при расчете периодических структур и достаточно полно изложен в работе [7]. Расчетная формула для дисперсионной характеристики сдвоенной плоской гребенки, т. е. для определения зависимости γ от λ , где фазовый угол γ определяется выражением $\gamma = \beta_0 L$, представлена в виде

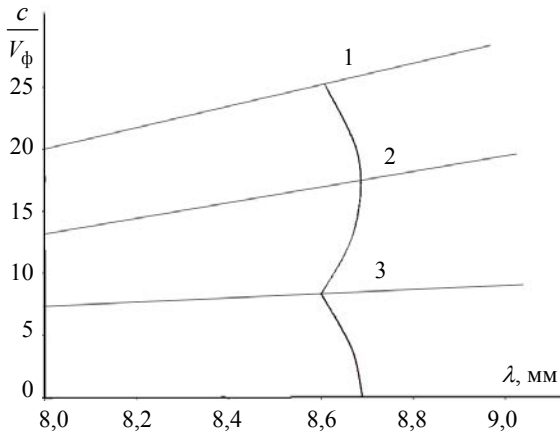
$$\frac{l}{h} \left(\frac{\sin \frac{\gamma l}{2L}}{\frac{\gamma l}{2L}} \right)^2 \left(\frac{\text{th} \frac{\gamma a}{2L}}{\text{cth} \frac{\gamma a}{2L}} \right) \frac{1}{\gamma} \cong \frac{\text{ctg} kh}{kh}.$$

На рис. 3 приведены дисперсионные кривые, построенные по формуле, приведенной выше, для синфазного и противофазного видов возбуждения колебаний, которые отличаются полосой пропускания. Наибольшая полоса принадлежит противофазному виду.

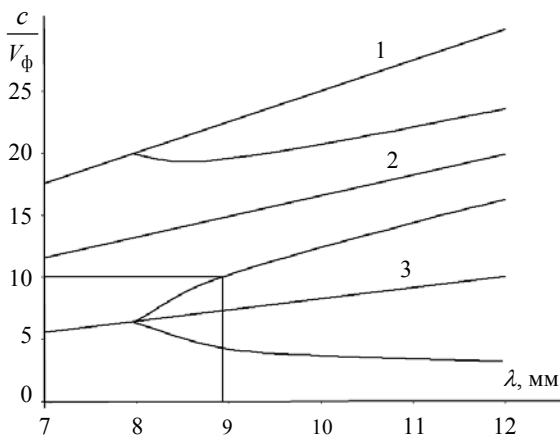
В примененной сдвоенной периодической структуре реализуется режим поверхностных волн $\beta_s^2 > k^2$, свидетельствующий о том, что все пространственные гармоники поля являются замедленными.

Действующий макет генератора работал в противофазном режиме колебаний на –1-й про-

странственной гармонике в диапазоне ускоряющих напряжений от 2 до 4 кВ и токах электронного пучка от 30 до 80 мА. Диапазон возбуждаемых волн заключался в пределах 8,5 до 9,5 мм (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Расчетные кривые дисперсии в координатах c/V_ϕ от λ для синфазного (а) и противофазного (б) режимов возбуждения сдвоенных плоских гребенок: 1 – $\varphi = 3\pi$; 2 – $\varphi = 2\pi$; 3 – $\varphi = \pi$

Следует отметить, что данный прибор относится к классу резонансных ЛОВ, которые имеют меньшие габариты и большую выходную мощность по сравнению с нерезонансными ЛОВ, что было очень важным фактором в постановке данного эксперимента. В силу своих резонансных свойств генератор возбуждался в дискретных зонах, которых было достаточно для проведения экспериментов. Выходная мощность в полосе перестройки прибора изменялась от нескольких десятков милливатт до 200 мВт. Данная конструкция модулятора на основе резонансной ЛОВ позволила сформировать на выходе прибора сгруппированный протяженный электронный пучок с поперечными размерами $4 \times 0,2$ мм.

На рис. 4 схематически изображен макет экспериментальной установки, в которой применен модулятор на основе сдвоенных гребенок. Электронные сгустки вбрасываются в вакуумное пространство из запердевного волновода на проволочный экран, расположенный перпендикулярно движению пучка. Проволочный экран представляет собой рамку размерами 2×2 см, на которую намотана молибденовая проволока толщиной 0,06 мм с шагом 0,2 мм. Таким образом, период лестничной структуры намного меньше длины замедленной волны ЛОВ, генерирующей электронные сгустки.

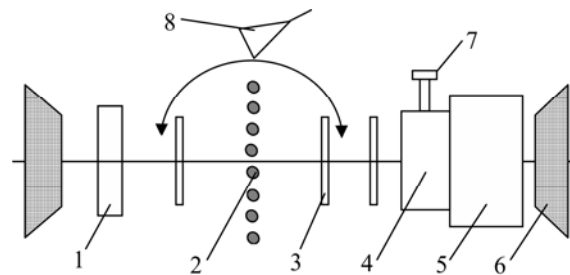


Рис. 4. Схематическое изображение действующей электровакуумной установки мм диапазона: 1 – коллектор; 2 – проволочный экран; 3 – электронный сгусток; 4 – блок замедляющих систем; 5 – блок электронной пушки; 6 – магнитная система; 7 – вывод СВЧ-энергии; 8 – приемник излучения электронов

Сгруппированные электронные сгустки, рассеиваясь на металлической решетке, возбуждают переходное излучение. Прием сигнала излучения осуществляется детекторной секцией, расположенной в ближней зоне вдоль структуры. Секция состоит из отрезка прямоугольного волновода и приемного диода Д 404 8-мм диапазона волн.

Металлическая решетка представляет собой полупрозрачный экран для электронного пучка, поэтому часть электронного тока пучка, пройдя сквозь экран, рассеивается на коллекторе. Для фокусировки электронного пучка применяется электромагнитная система с напряженностью 0,3...0,4 Тл и магнитным зазором около 100 мм.

Важным обстоятельством при создании конструкции лампы и длины пролетного пространства электронных сгустков является выбор места расположения металлической решетки. Необходимо учесть два фактора:

- решетка не должна очень близко располагаться к торцу модулятора, иначе будет искажаться диаграмма направленности переходного излучения от нее;

- необходимо помнить о том, что сформированные лампой электронные сгустки в пролетном пространстве меняют свою форму по мере их продвижения от модулятора к коллектору. Для

примера, взятого из работы [8], воспользуемся графиком изменения сгруппированного тока в пролетном пространстве за модулятором (рис. 5).

Если учесть реальные условия, то поведение сгруппированного тока в вакуумном пространстве будет еще более сложным за счет действия расталкивающих кулоновских сил пространственного заряда и сдерживающего влияния фокусирующего магнитного поля.

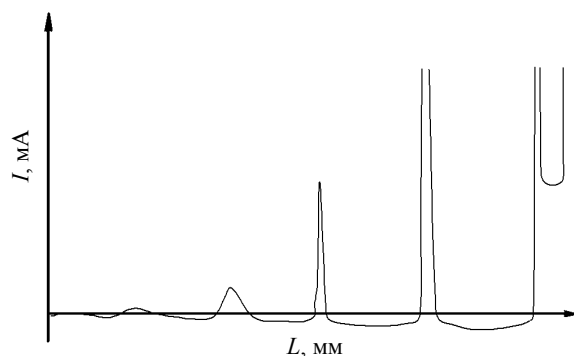


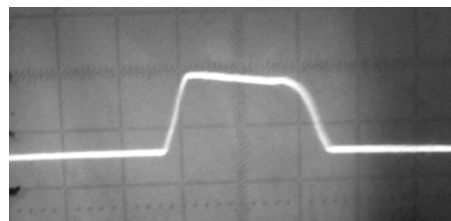
Рис. 5. Зависимость величины сгруппированного тока от длины пространства группировки

Учитывая сложность ситуации, в первую очередь принималось решение на достижение минимальных расстояний между конструктивными элементами, а также учитывались возможности изготовления прибора. Принимая это во внимание, величина расстояния от торца лампы до экрана составила 20 мм и расстояние от экрана до коллектора тоже 20 мм.

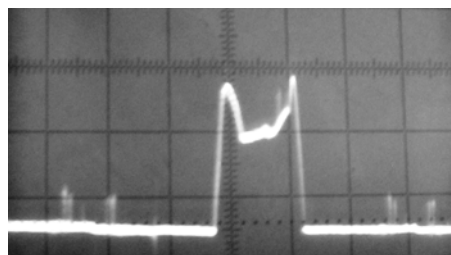
2. Обсуждение результатов исследований. Прозрачность решетки определялась из соображений, что при прохождении через нее электронного сгустка одна часть его энергии рассеивается на лестнице, а другая – на коллекторе. Отношение токов на сетке и коллекторе дает искомую прозрачность сетки. По полученным экспериментальным данным она составила порядка 0,3.

Правильность выбора места расположения металлической решетки была подтверждена экспериментально. На рис. 6 приведены осциллограммы основного сигнала с ЛОВ, которая выступала в роли генератора, формирующего последовательность электронных сгустков и сигнала переходного излучения от металлического проволочного экрана. Соотношение интенсивностей излучения разнятся примерно на 2 порядка. Если мощность колебаний ЛОВ составляла 90 мВт, то мощность переходного излучения была на уровне 2...4 мВт. Для большей достоверности экспериментальных результатов в процессе измерений переходного и основного излучений использовались одни и те же СВЧ-элементы (детектор Д 404, аттенюатор, осциллограф). Как видно из осциллограмм, сигналы различаются по

форме, таким образом, спектр электронного сгустка в своем составе имеет ряд гармоник.



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы излучения ЛОВ 8-мм диапазона волн (а) и переходного излучения от электронного сгустка, падающего перпендикулярно образующим металлической лестницы (б)

На рис. 7 представлена иллюстрация, качественно объясняющая характер регистрируемого переходного излучения. Пики при U_1 , U_2 и U_3 соответствуют синхронизму электронов пучка с замедленной волной по кривой дисперсии.

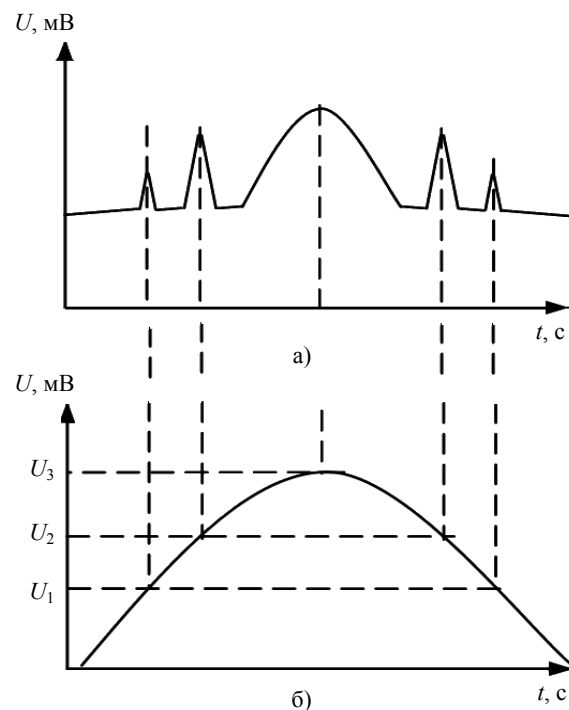


Рис. 7. Характер регистрируемого переходного излучения (а) и зависимость ускоряющего напряжения U от времени (б)

Полученное распределение (рис. 8), имеет 3 максимума. Первый максимум, как и предполагалось теоретически, находится напротив лестничной структуры. Появление второго максимума в области между экраном и запердельным волноводом можно объяснить следующим образом: сгруппированный электронный сгусток, вылетая из модулятора, оказывается в среде с параметром распространения, отличным от того, который был в пространстве модулятора.

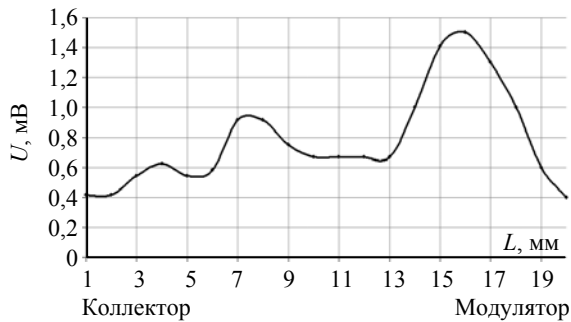


Рис. 8. Распределение потока энергии переходного излучения от электронного сгустка, падающего перпендикулярно образующим металлической лестницы при $U_a = 2,55$ кВ, $I_a = 72$ мА, $I_n = 7,5$ А

В результате, согласно своей природе возникновения, появляется переходное излучение. Различие максимумов распределения потока энергии переходного излучения по амплитуде объясняется тем, что происходит частичная разгруппировка электронного сгустка при его движении от запердельного волновода к проволочному экрану. Переменная составляющая тока электронного пучка падает. Как результат уменьшается мощность переходного излучения от электронного сгустка, падающего на экран.

Чтобы убедиться в том, что регистрируемое излучение действительно является переходным, исследуемая структура на холодных измерениях исследовалась на предмет просачивания волны через запердельный волновод, расположенный на выходе модулятора. Для этого к волноводному выходу подключался генератор 8-мм диапазона. По данным холодных измерений оказалось, что мощность просачивающегося излучения составила около 1 % от мощности внешнего генератора. Из этого можно сделать заключение, что наблюдаемое излучение, возбуждаемое модулированным пучком электронов в области запердельного волновода, действительно было переходным.

На рис. 9 в аксонометрии показано падение электронного сгустка на металлическую лестницу под прямым углом, что подтверждается распределением поля. Однолепестковые лучи располагаются параллельно направляющим проволочкам.

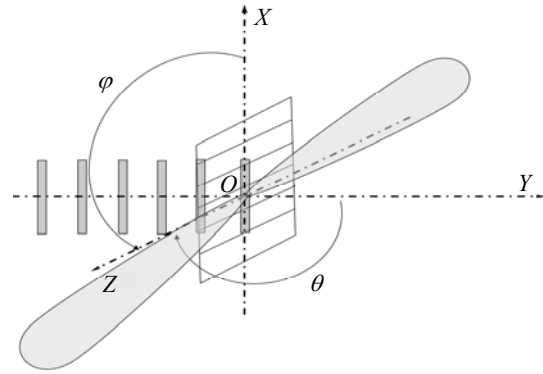


Рис. 9. Распределение поля переходного излучения, возбуждаемого электронным сгустком, который падает на проволочный экран

На рис. 10 представлены токовые зависимости мощности переходного излучения для нескольких значений напряжений на электронной пушке ЛОВ, в частности для 2,55 и 2,7 кВ. Они носят линейный характер в пределах небольших изменений абсолютного тока электронного пучка. Это свидетельствует о том, что проволочный экран наиболее близко находится к месту оптимальной группировки электронного сгустка при напряжении на аноде пушки $U_a = 2,7$ кВ и соответствующей частоте модуляции, а пространственный заряд слабо влияет на длину электронной волны.

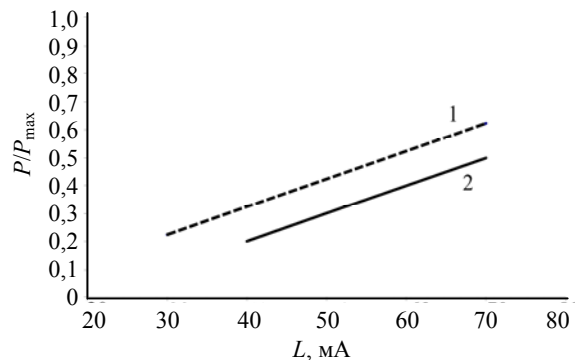


Рис. 10. Зависимость мощности переходного излучения от сгруппированного тока электронного потока для двух значений ускоряющего напряжения ЛОВ: 1 – $U_a = 2,7$ кВ; 2 – $U_a = 2,5$ кВ

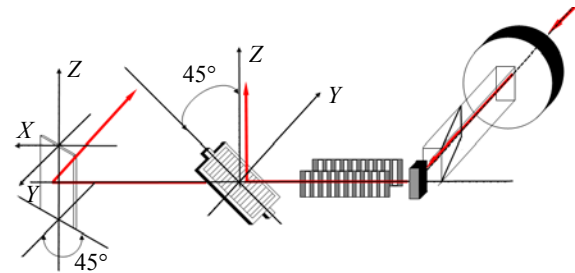


Рис. 11. Перспективная экспериментальная система исследования рассеивания энергии модулированного электронного пучка на проволочном экране

Для разделения переходного излучения, возбуждаемого электронными сгустками на проволочном экране, от излучения, возбуждаемого электронами при бомбардировке коллектора, была предложена система, приведенная на рис. 11.

Следовательно, представляется возможным измерить без помех распределение энергии переходного излучения в пределах пространственных координат $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]; \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$.

Выводы. Таким образом, экспериментально исследовано переходное излучение последовательности электронных сгустков, пересекающих проволочный экран. Предложен, рассчитан и сконструирован модулятор на замедляющей системе типа сдвоенная гребенка, позволяющий эффективно группировать электронный поток. В мм диапазоне длин волн при среднем уровне СВЧ-мощности ЛОВ-группирователя было экспериментально обнаружено излучение последовательности электронных сгустков, пересекающих неоднородность в виде проволочного экрана. Показано, что регистрируемое излучение действительно является переходным. Экспериментально полученная диаграмма переходного излучения качественно совпадает с теоретическими расчетами [3]. Направление наибольшей интенсивности излучения при взаимной ортогональной ориентации сгустков и проволоки совпадает с направлением проволоки решетки, причем максимальное значение поля переходного излучения наблюдается вблизи модулятора.

Авторы выражают благодарность академику НАН Украины В. М. Яковенко за участие в обсуждении результатов исследований и полезные критические замечания.

1. Гинзбург В. Л. Переходное излучение и переходное рассеяние / В. Л. Гинзбург, В. Н. Цытович. – М.: Наука, 1984. – 360 с.
2. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энцикл., 1984. – 529 с.
3. Аверков Ю. О. Переходное излучение модулированного электронного потока, пересекающего проволочный экран / Ю. О. Аверков, В. М. Яковенко // Радиофизика и электрон.: сб науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 3. – С. 337–343.
4. Аверков Ю. О. Переходное излучение негармонических импульсов / Ю. О. Аверков, В. М. Яковенко // Журн. техн. физики. – 2006. – 76, вып. 5. – С. 98–104.

5. Брагинский В. Б. Экспериментальное исследование излучения электронных сгустков вблизи неоднородностей / В. Б. Брагинский, Е. Р. Мустель // Изв. вузов. Радиофизика. – 1958. – 1, № 3. – С. 124–127.
6. Буртыка М. В. Электромагнитное излучение модулированных электронных пучков, падающих на металлические неоднородности / М. В. Буртыка, А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // Физика и техн. миллиметровых и субмиллиметровых волн: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1983. – С. 155–163.
7. Альтишулер Ю. Г. Лампы малой мощности с обратной волной / Ю. Г. Альтишулер, А. С. Татаренко. – М.: Сов. радио, 1963. – 296 с.
8. Шевчик В. Н. Основы электроники сверхвысоких частот / В. Н. Шевчик. – М.: Сов. радио, 1959. – 308 с.

B. P. Yefimov, A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko

TRANSITIONAL RADIATION EXCITED BY ELECTRON BUNCHES ON WIRE SCREEN IN MILLIMETER RANGE

The experimental results on research of transitional radiation excited by electron bunches, which are scattered on periodic inhomogeneities in the form of a wire ladder structure have been presented. The modulator (generator of electron bunches) created by resonant backward wave oscillator in 8 mm band is described. It is shown that measured transition radiation pattern is in good agreement with theoretical calculations.

Key words: modulated electron beam, backward wave oscillator, coupled grating of planar combs, wire screen, transition radiation.

Б. П. Єфімов, А. Н. Кулешов, С. С. Пономаренко

ЗБУДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЕЛЕКТРОННИМИ ЗГУСТКАМИ, ЩО ПАДАЮТЬ НА ДРОТЯНИЙ ЕКРАН

Наведені експериментальні результати вивчення властивостей перехідного випромінювання, яке збуджено електронним потоком, розсіяним на періодичних неоднорідностях у вигляді дротяної періодичної структури. Описано модулятор (генератор електронних згустків), створений на основі резонансної лампи зворотної хвилі 8-мм діапазону довжин хвиль. Показано, що розподіл потоку енергії та інтенсивність перехідного випромінювання якісно збігається з результатами теоретичних розрахунків.

Ключові слова: модульований електронний потік, лампа зворотної хвилі, здвоєна система типу плоскої гребінки, що сповільнює рух, дротяний екран, перехідне випромінювання.

Рукопись поступила 23.02.11 г.