

УДК 537.56.533.9

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

А. Ф. Александров, С. Ю. Галузо, А. М. Кузнецов

(кафедра физической электроники)

Описывается способ наблюдения пространственного распределения СВЧ-излучения релятивистского сильнотоочного импульсного черенковского генератора, использующий СВЧ-пробой воздуха при пониженном давлении в тонкостенной камере, образованной поверхностью двух диэлектриков.

Для определения генерируемого типа колебаний и мощности излучения сильно-точных устройств релятивистской СВЧ-электроники, как правило, измеряют пространственное распределение излучения на выходе. Наиболее полно, с хорошим временным разрешением определить пространственное распределение СВЧ-излучения можно с помощью полупроводниковых датчиков на горячих носителях [1], на которые подается часть выходного излучения, принимаемая малой антенной. Менее трудоемким является способ оценки диаграммы направленности СВЧ-излучения по интенсивности свечения табло, состоящего из часто расположенных небольших неоновых лампочек [2]. В [3] эту задачу решали с помощью тонкой металлизированной лавсановой пленки с большим коэффициентом поглощения. Для этих же целей можно использовать жидкокристаллические термоминдикаторы, фотолюминесцирующие активированные кристаллофосфоры [4]. В последнее время был выполнен ряд экспериментов [5], по использованию СВЧ-пробоя газа при различных давлениях (в том числе и воздуха при атмосферном давлении) для диагностики источников СВЧ-импульсов: определения генерируемого типа колебаний — по виду ионизированной области, выходной мощности — по пробойным характеристикам.

В данной работе сделана попытка определения пространственного распределения СВЧ-излучения с помощью СВЧ-пробоя воздуха в диэлектрической камере пониженного давления с малыми размерами пробойного промежутка.

Эксперименты проводились на сильнотоочном электронном ускорителе «Тандем-1» [6, 7] с использованием в качестве источника СВЧ-излучения черенковского генератора — карсинотрона. Генератор был рассчитан для работы на моде E_{01} круглого волновода. Длина волны генерируемого СВЧ-излучения составляла $\sim 5,5$ см. На рис. 1, а приведено взаимное расположение регистрирующих СВЧ-излучение устройств и результаты измерения диаграммы направленности с помощью детектора на горячих носителях, на который подавалась часть выходной СВЧ-мощности, принимаемая открытым концом волновода размерами $7,2 \times 3,4$ см. По этим измерениям можно было оценить минимальную величину мощности выходного СВЧ-излучения, которая в нашем случае составила 10 МВт. В экспериментах регистрировались импульсы СВЧ-излучения с длительностью по основанию около 300 нс. В представленной схеме предварительных экспериментов по СВЧ-пробою воздуха при давлениях ниже атмосферного использовалась плоскопараллельная камера из диэлектрика, помещаемая на пути потока СВЧ-излучения вблизи выходного окна. Размеры камеры составляли $27 \times 23,5$ см при зазоре между пластинами 1 см. В экспериментах можно было менять давление воздуха в камере. Интегральная картина СВЧ-пробоя в ячейке фиксировалась фотоаппаратом.

При давлениях в камере выше 400 Тор пробоя воздуха не наблюдалось. Изменяя давление в сторону его уменьшения, удалось получить интегральные по времени фотографии светящихся областей газа. На рис. 2 эти фотографии представлены для давлений в диэлектрической камере 250, 100 и 50 Тор. При давлении 250 Тор пробой воздуха носит «очаговый» характер. При понижении давления воздуха до 100 Тор на фотографиях можно выделить две концентрические кольцевые светящиеся области. Диаметр внешней области соответствует диаметру азимутально неоднородных образований на фотографиях пробоя при давлении 250 Тор. Диаметр внутренней светящейся области примерно соответствует диаметру области с максимумом радиальной составляющей электрического поля для рабочей моды генератора E_{01} . Наличие области локализации потока СВЧ-энергии большего диаметра, по-видимому, связано с дифракцией рабочей волны на выходном рупоре. При этом контраст изображения уменьшается, отдельные светящиеся области начинают сливаться. При давлении

Рис. 1. *а* — Схема экспериментов: 1 — камера из диэлектрика с регулируемым давлением воздуха, 2 — выходное СВЧ-окно, 3 — натекатель, 4 — детектор СВЧ-излучения на горячих носителях заряда, 5 — фотоаппарат. *б* — Схематическое изображение поверхности соприкосновения двух диэлектриков (1) и (2), образующих микроячейки (3) с давлением воздуха ниже атмосферного

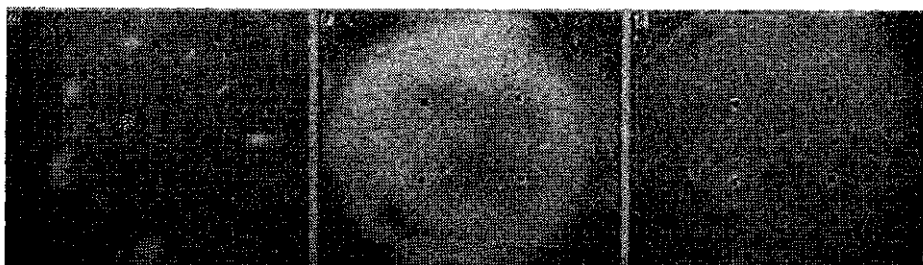
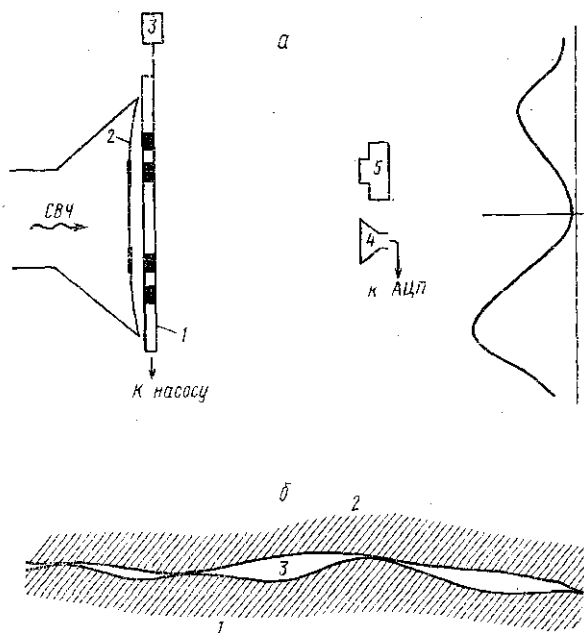


Рис. 2. Интегральные фотографии пробоя воздуха в плоскопараллельной диэлектрической ячейке при различных давлениях воздуха: 250 (*а*), 100 (*б*) и 50 Тор (*в*)



Рис. 3. Фотографии выходного двухслойного СВЧ-окна: *а* — пробой при работающем СВЧ-генераторе, *б* — СВЧ-генератор отсутствует

50 Тор развитие пробоя наблюдается по всему объему ячейки и информация о структуре СВЧ-поля теряется.

Из анализа проведенных экспериментов следует, что определение пространственного распределения СВЧ-излучения с помощью пробоя воздуха в плоскопараллельной камере путем регистрации интегральных фотографий низованных областей требует строгого подбора критического давления. При давлении меньше критического условие пробоя становится менее жестким и область интенсивного свечения образуется по все большему объему камеры. По наличию СВЧ-пробоя в плоскопараллельной камере при давлении 100 Тор можно также оценить минимальную величину мощности высокочастотного излучения генератора. С учетом данных работы [8] эта мощность составляла в наших экспериментах 20 МВт. Эта оценка согласуется с данными измерений с помощью детектора на горячих носителях.

Существенно упростить схему экспериментов по визуализации пространственного распределения мощности выходного излучения генератора по регистрации СВЧ-пробоя можно, заменив однослойное выходное СВЧ-окно, отделяющее вакуумную часть установки от окружающего пространства на двухслойное (см. рис. 1,а). В наших экспериментах двухслойное СВЧ-окно выполнялось из листа тефлона толщиной 5 мм и листа лавсана толщиной 0,1 мм, между поверхностями которых образуются микроячейки (рис. 1,б). Пространство между диэлектриками откачивалось через несколько отверстий в тефлоне диаметром менее 0,2 мм с помощью основной вакуумной системы ускорителя.

Одна из интегральных фотографий пробоя в системе двухслойного выходного СВЧ-окна (тефлон—лавсан) приведена на рис. 3,а. На рис. 3,б приведена фотография этой же системы в отсутствие СВЧ-излучения, когда замедляющая система СВЧ-генератора была заменена отрезком гладкого волновода. Видно, что есть слабое влияние засветки от плазмы катодного факела и явления, связанные с осаждением электронного пучка на выходе СВЧ-генератора. Таким образом, образование светящейся области на фотографии рис. 3,а ($P_{\text{СВЧ}} \neq 0$) действительно связано с СВЧ-пробоем между поверхностями тефлона и лавсана. На это же указывает постепенное накопление продуктов окисления диэлектрических материалов камеры между слоями тефлона и лавсана, что с течением времени должно приводить к увеличению чувствительности регистрирующей камеры [8]. Полученная в экспериментах с двухслойным СВЧ-окном четкая картина СВЧ-пробоя позволяет однозначно идентифицировать рабочую моду генератора как E_{01} . Диаметр светящейся области при этом соответствует максимуму потока энергии на рабочей моде генератора.

Одним из недостатков предлагаемого способа визуализации пространственного распределения СВЧ-мощности является неопределенность в его чувствительности. Это связано как с неизвестным средним значением давления газа в микроячейках между поверхностями диэлектриков, так и со сложным механизмом пробоя, в котором может быть велика роль эффектов взаимодействия электронов с поверхностью диэлектрика. На это указывает, в частности, тот факт, что амплитуда осциллирующий электрона в характерных для эксперимента полях сравнима, а в некоторых случаях превышает размеры микроячеек.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Райзер М. Д., Цопп Л. Э. // Радиотехн. и электроника. 1975. 20, № 8. С. 1691. [2] Ковалев Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. 18, № 4. С. 232. [3] Виноградов Е. А., Голованов В. И., Ирисова Н. А. и др. // ЖТФ. 1982. 52, № 7. С. 1458. [4] Белоусов В. И., Зеленцов В. И., Офицеров М. М. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. С. 275. [5] Вихарев А. Л., Иванов О. А., Степанов А. Н. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 212. [6] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. др. // ЖТФ. 1980. 50, № 11. С. 2381. [7] Басиладзе С. Г., Галузо С. Ю., Каравичев М. В. и др. // Модули и программное обеспечение систем автоматизации экспериментальных исследований. М., 1990. С. 130. [8] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М., 1969.

Поступила в редакцию
08.04.92