

Визуализация мощного СВЧ-излучения при инициировании различными металлодиэлектрическими экранами газового плазменного пробоя на разных расстояниях

С.А. Буланова^{1,2}, М.С. Гитлин¹, А.П. Фокин¹, А.А. Ананичев^{1,2}, А.А. Орловский¹, М.Ю. Глявин^{1,2}, А.И. Цветков¹

¹Институт Прикладной Физики РАН

²ННГУ им. Н.И.Лобачевского

Аннотация: работа посвящена развитию методики визуализации мощного СВЧ-пучка при помощи пробоя газового разряда инициированного взаимодействием излучения с металлодиэлектрическим экраном. В работе представлены результаты исследования зависимости порога пробоя, инициированного металлодиэлектрическим экраном от характеристик экрана (размера, материала и плотности нанесения частиц), а также применение исследуемого метода к восстановлению зависимости профиля пучка микроволнового излучения от расстояния до источника.

Ключевые слова: Гауссовы лучи, гиротроны, визуализация СВЧ-излучения.

1. Введение

Для работы с мощными СВЧ-источниками направленного действия зачастую необходимо знать параметры пучка сгенерированного электромагнитного излучения. Существуют различные методики для из визуализации, в частности применение тепловых эффектов воздействия микроволнового излучения. Одним из самых простых методов является нагрев термобумаги, однако точность его невысока и в результате получаются интегрированные по времени изображения пучка [1]. Также есть методика визуализации при помощи воздействия излучения на диэлектрик и регистрации тепловизором температуры нагрева поверхности, однако, в этом случае невозможно получить изображение пучка для короткоимпульсного режима в случае низкой частоты следования импульсов. Кроме того, следует отметить, что чувствительная тепловизионная камера является дорогостоящим устройством [2,3]. Существуют методы, применяющие плазменный газовый разряд. Изображения пучков микроволнового излучения были получены с использованием массива детекторов тлеющего разряда в работах [4–6], но такие массивы представляют собой довольно сложные системы, которые обычно имеют небольшое количество детекторных блоков с относительно большим расстоянием между ними.

Данная работа направлена на развитие методики визуализации СВЧ-пучков с использованием излучения видимого света индуцированного газового пробоя, инициированного поверхностью металлодиэлектрического экрана (МДЭ). Для достижения данной цели было необходимо изучить зависимость порога пробоя, инициированного МДЭ, от размера, материала и поверхностной плотности металлических частиц. Уменьшение требуемой интенсивности микроволнового излучения позволило изучить особенности визуализации пучка на различных расстояниях от источника излучения.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

В экспериментах была использована установка, состоящая из источника мощного

микроволнового излучения (гиротрона с частотой излучения 250 ГГц), камеры с МДЭ, CCD-камеры и системы синхронизации и регистрации снимков [7]. Камера с МДЭ состояла из корпуса, МДЭ, майларовой пленки, газовых клапанов, резиновых уплотнений. Корпус камеры изготовлен из нержавеющей стали в виде цилиндрической кюветы, на дне которой закреплялся металлодиэлектрический экран. Параллельно экрану расположено майларовое окно. Поскольку толщина окна намного меньше длины волны, влиянием окна на профиль пучка можно пренебречь. Камера заполнялась газом через газовые клапаны, установленные на задней стенке корпуса камеры. Давление контролировалось мановакуумметром. Излучение, попадая в наполненную газом кювету на МДЭ, инициировало плазменное свечение, которое регистрировалось на CCD-камеру. Далее изображения, полученные после эксперимента были обработаны с применением перспективного преобразования.

Экран представляет собой подложку из акрилового стекла, на которую при помощи клея нанесены металлические частицы. На первом этапе было изготовлено 10 различных экранов, отличающихся материалом и размером металлических частиц, а также их поверхностной плотностью и высотой частиц над поверхностью экрана. Размеры частиц были варьированы по двум фракциям до 0.1 мм и более 0.1 мм, материалом служили алюминий и железо, а относительная плотность насыпания была измерена по светопропусканию МДЭ.

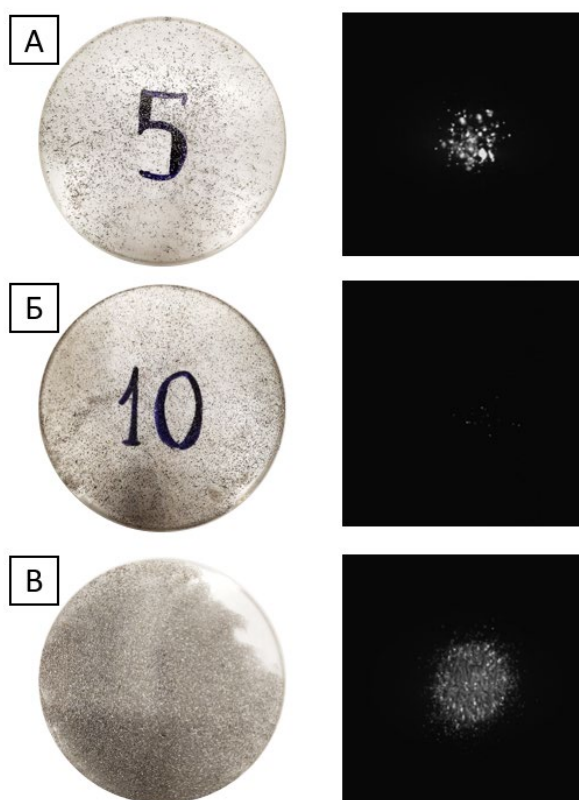


Рисунок 1. Фотографии экранов (справа) с различной поверхностной плотностью частиц и свечение плазмы (слева) при мощности микроволнового излучения в 250 кВт для следующих МДЭ: А – плотность насыпания алюминия 35% с характерным размером более 0.1 мм; Б – плотность насыпания железа 35% с характерным размером менее 0.1 мм; В – плотность насыпания алюминия 60% с характерным размером менее 0.1 мм.

Далее эти экраны помещались в кювету, заполненную воздухом при атмосферном давлении. Исследовалась яркость свечения плазмы разряда и минимальная интенсивность, при которой еще регистрировалось свечение. Эксперимент

проводился следующим образом: при помощи системы синхронизации происходило включение генерации СВЧ-излучения гиротроном и регистрации изображения CCD-камерой с задержкой 25 мкс. Было установлено, что порог пробоя, инициированного МДЭ, практически не зависит от материала металлических частиц, однако существенно зависит от поверхностной плотности и высоты частиц над поверхностью. Продемонстрированное в эксперименте снижение порога пробоя достигало до 2,5 раз.

3. Исследование профиля пучка от расстояния до источника

Полученное за счет оптимизации МДЭ снижение пороговой интенсивности микроволнового излучения позволило увеличить расстояние от источника до кюветы с МДЭ, на котором регистрировалось свечение плазмы пробоя. Это позволило исследовать при помощи данного метода зависимость профиля пучка от расстояния до источника.

В этом эксперименте кювета заполнялась гелием при давлении 1.1 атм. для еще большего снижения порога пробоя. Были сняты изображения разряда при расстояниях до окна гиротрона 0,8 м, 1,6 м и 2,4 м.

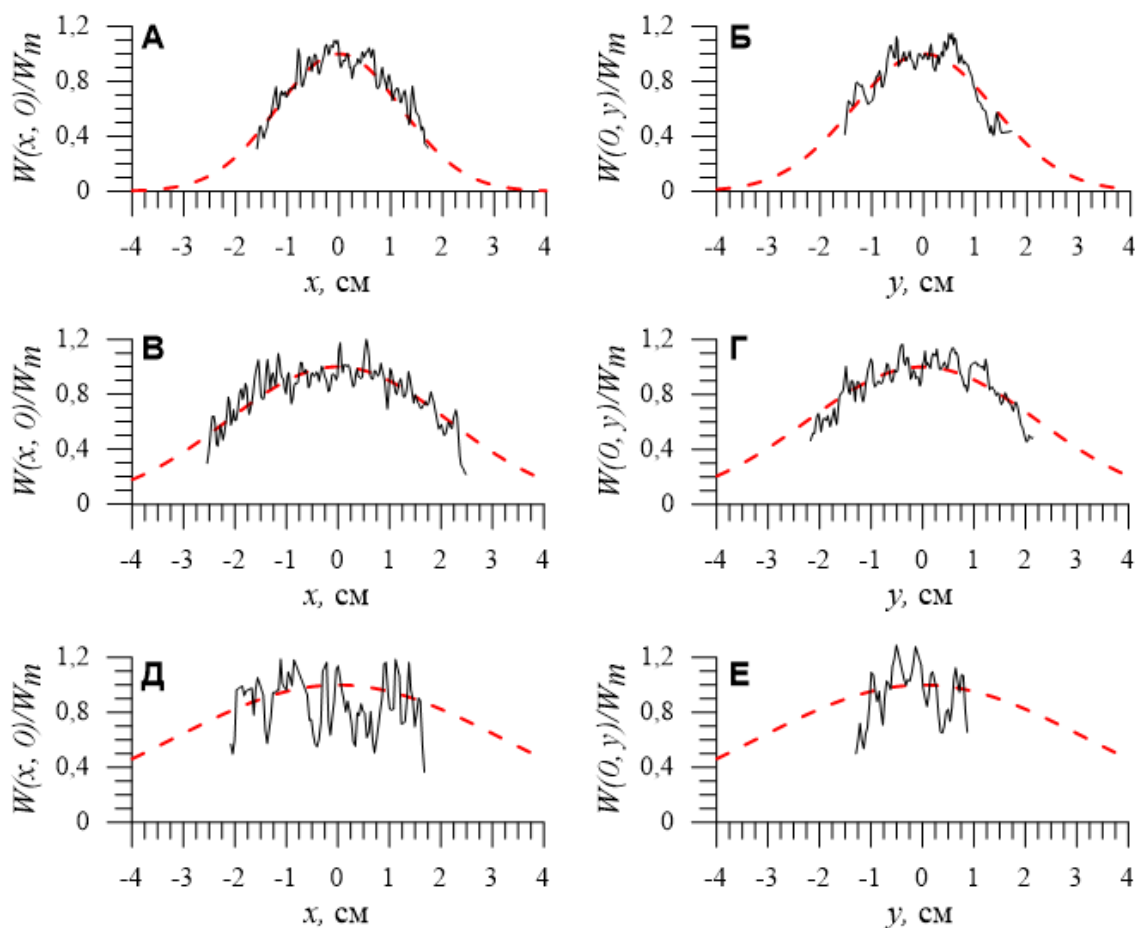


Рисунок 2. Горизонтальные (слева) и вертикальные (справа) поперечные сечения восстановленного профиля интенсивности $W(x, y)$ (сплошные черные линии) и эталонный профиль пучка (красные пунктирные линии) для расстояний от источника 0,8 м (А, Б), 1,6 м (В, Г), 2,4 м (Д, Е).

Исходя из профилей интенсивности (рисунок 2) можно сказать о том, что методика достаточно хорошо согласуется для расстояний 0,8 м и 1,6 м и зависит от порога пробоя плазмы, поэтому на расстоянии 2,4 м результат слабо согласуется, но тем не менее прослеживается корреляция с расчетами.

4. Заключение

В работе представлено развитие методики визуализации пучков мощного микроволнового излучения при помощи свечения разряда в газе, инициированного металлодиэлектрическим экраном. Показана существенная зависимость порога пробоя от поверхностной плотности металлических частиц на экране, продемонстрировано уменьшение порога пробоя в 2,5 раза по сравнению с мишенью, использовавшейся в ранних экспериментах [8].

Уменьшение порога пробоя позволило исследовать при помощи разрабатываемой методики зависимость профиля пучка излучения от расстояния до источника. Полученные в эксперименте зависимости ширины пучка от расстояния показывают хорошее совпадение с теоретическими расчетами.

Исследование выполнено при поддержке гранта **Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 20-08-0611)**.

Список литературы

1. Junchang L., Yanmei W. An indirect algorithm of Fresnel diffraction // Optics Communications. 2009. Vol. 282, № 4. P. 455–458.
2. Malygin V.I., Paveljev A.B. DETERMINATION OF THE MODE CONTENT IN SPURIOUS MICROWAVE RADIATION OF THE GYROTRON WITH A STRAIGHT AXISYMMETRIC OUTPUT // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1999. Vol. 20, № 1.
3. Aleksandrov N.L. et al. MODE CONTENT ANALYSIS FROM INTENSITY MEASUREMENTS IN A FEW CROSS SECTIONS OF OVERSIZED WAVEGUIDES // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1997. Vol. 18, № 6.
4. Rozban D. et al. Inexpensive THz focal plane array imaging using miniature neon indicator lamps as detectors // IEEE Sensors Journal. 2011. Vol. 11, № 9. P. 1962–1968.
5. Brooker G., Johnson D.G. Low-cost millimeter wave imaging using a commercial plasma display // IEEE Sensors Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. Vol. 15, № 6. P. 3557–3564.
6. Levanon A. et al. Calibration method for MMW imaging using inexpensive miniature neon indicator lamp detectors // IEEE Sensors Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. Vol. 14, № 5. P. 1677–1681.
7. Gitlin M.S. et al. Imaging of a High-Power Millimeter Wave Beam Using a Millimeter Wave-Induced Gas Breakdown Initiated by a Metal-Dielectric Screen // IEEE Transactions on Plasma Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. Vol. 50, № 2. P. 267–274.
8. Gitlin M. et al. Imaging of a high-power millimeter-wave beam using a microwave gas breakdown initiated by a metal-dielectric screen. SPIE-Intl Soc Optical Eng, 2020. P. 47.