

С. И. Хоменко, М. О. Хорунжий, А. Н. Кулешов, Б. П. Ефимов

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЛОКАЦИИ

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: bigmax113@mail.ru

На макете когерентной гомодинной приемо-передающей измерительной установки проведены исследования плазменных образований типа страт. Проанализированы частотные особенности отражения от страт, угловые зависимости, амплитуда отражений от страт в зависимости от тока и типа генератора шума. Оценена эффективная поверхность рассеяния плазменных образований типа страт. Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: доплеровский локатор, положительный столб ионизированной плазмы, страты, плазменно-лучевой генератор шума, двухканальный приемопередатчик гомодинного типа, скоростная видеокамера.

Способов и методов изучения плазмы существует достаточно много [1], в зависимости от изучаемой плазмы: горячая или холодная, непрерывная (стационарная) или кратковременная (импульсная) и др. К наиболее распространенным способам исследования относятся бесконтактные: СВЧ и лазерные методы, а также пассивная диагностика – определение параметров плазмы по собственному излучению.

Образование сгустков и разрядов в плазменном столбе – первое проявление неустойчивости, которыми богата плазма [2–5]. Изучение состояний неустойчивости дает возможность определения основных характеристик слабо ионизированной плазмы, присутствующей в магнито-

гидродинамических генераторах энергии, плазменных волноводах, газовых лазерах и других устройствах. Нами рассматривается метод дистанционного исследования характеристик слабо ионизированной плазмы, возникающей в генераторах шума (ГШ), при помощи двух-частотного доплеровского локатора гомодинного типа. Этот метод может применяться для анализа более сложных плазменных образований.

1. Методика измерений и описание экспериментальной установки. Для исследования амплитудно-фазовых характеристик плазменных образований типа страт использовался приемопередатчик гомодинного типа (рис. 1).

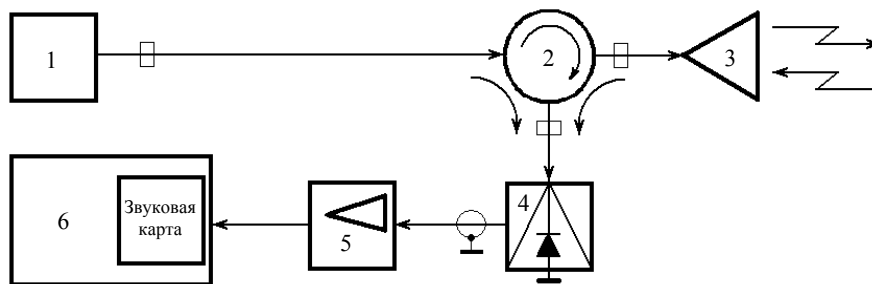


Рис. 1. Схематическое изображение приемопередатчика гомодинного типа на ферритовом циркуляторе: 1 – генератор; 2 – циркулятор; 3 – рупорная антенна; 4 – смеситель; 5 – селективный усилитель; 6 – персональный компьютер

В состав измерительного макета входил приемо-передающий комплекс на волнах 8 мм и 3,2 см, селективные усилители ЯС4-75/1 с полосой частот 0,1...50 кГц, динамическим диапазоном 60 дБ и режекцией «пролаза» на частоте 50 Гц. Анализ спектра сигналов, отраженных от плазменных образований проводился на ПЭВМ при помощи программы «Spectrolab», а также на анализаторе спектра СК4-72, работающем в реальном масштабе времени. На ПЭВМ обработка информации на двух каналах проводилась одновре-

менно, что позволяло разделять амплитудную и фазовую модуляции. Также была проведена видеосъемка страт в плазменном газоразрядном генераторе, которая производилась с помощью скоростной цифровой камеры *Casio exelim pro FX-1*, реализующей временное разрешение 1 200 кадров в секунду.

На первом этапе отработки метода доплеровского зондирования плазмы объектом исследования были выбраны газоразрядные плазменные источники – ГШ мм и см волн, которые

широко используются в радиотехнической СВЧ-аппаратуре для калибровки и настройки приемных устройств см и мм диапазонов волн. Они представляют собой стеклянные трубки, наполненные нейтральным газом под давлением 1...10 мм рт. ст. Напряжение поджига применялось в диапазоне 0,8...5,0 кВ. Спектральная плотность мощности находилась в пределах 62 kT_0 .

Применение методики доплеровской локации для лоцирования плазменного столба в ГШ интересно тем, что некоторые особенности режима возбуждения плазмы известны, например в трубке происходят два противоположных электрических процесса: образование заряженных частиц и их исчезновение в плазме благодаря рекомбинации в объеме под действием электрического поля и диффузии. Ионизация происходит в основном при соударениях ускоренных внешним электрическим полем электронов с нейтральными частицами газа.

Калибровка приемно-передающего измерительного комплекса проводилась с помощью сферы диаметром 6,5 мм, подвешенной на гибкой неотражающей подвеске.

Газоразрядная лампа размещалась на вращающемся столе, что позволяло менять угол между источником плазмы и радиолучем измерительного комплекса. Положение угла лоцирования в процессе опытов изменялось от 0° до $\pm 90^\circ$. Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

Чтобы исключить появление фоновых линий (50, 100, 150, 200 Гц и т. д.), генератор плазменных образований запитывался от источника стабилизированного напряжения +600 В со ступенчатой и плавной регулировкой напряжения. Это позволяло в широких пределах регулировать ток генератора плазменных образований. В процессе опытов использовались 5 типов плазменно-лучевых ГШ: ГШ-2, ГШ-3, ГШ-5, ГШ-6, ГШ-10, ГШ-11.

2. Обсуждение результатов измерений.

Для исследования особенностей амплитудно-фазовой модуляции в двухчастотном приемно-передающем устройстве использовался имитатор. Имитатор амплитудно-частотной модуляции представлял собой вращающийся диполь. При нормальном угле падения радиоволн детектировалась амплитудная модуляция. При изменении угла между плоскостью вращения и плоскостью падающей волны возникали условия, при которых, кроме амплитудной, появлялась и фазовая модуляция. Четверть периода диполь имел положительный доплеровский сдвиг, а вторую четверть периода – отрицательный. С помощью имитатора моделировались различные формы отраженных импульсов, частотные зависимости от углов визирования, поляризации излучения, частоты радиоколесаний.

Программой исследований предусматривалась работа измерительного макета на двух частотах одновременно, что позволяло разделить амплитудную и фазовую (частотную) модуляцию в генераторе плазменных образований. Как известно [1], амплитудная модуляция не зависит от частоты колебаний, а определяется формой модулирующего импульса, т. е. конфигурацией плазменных образований. С изменением угла визирования плазменного образования в виде страт меняется амплитуда и форма спектра отраженного сигнала, причем расположение линий в спектре на оси частот не меняет своего положения. Изменение угла визирования частотно-модулированного сигнала относительно плазменного шнура, приводит к сдвигу спектра по оси доплеровских частот. По форме спектра, отраженного от плазменного образования, можно судить о конфигурации страт.

Поляризационная зависимость отражений от страт исследовалась путем изменения положения оси генератора плазменных образований с горизонтального на вертикальное.

Фиксация страт в плазменном газоразрядном генераторе производилась с помощью скоростной цифровой камеры *Casio exelim pro FX-1*, обладающей возможностью производить видеосъемку со скоростью 1 200 кадров в секунду. В результате проведенных опытов установлено, что страты бывают неподвижные и бегущие [1]. Неподвижные страты фиксируются, как правило, при токе ниже номинального для данного типа ГШ. Максимальные скорости были зафиксированы при токе на 10–15 % выше номинального значения и составляли $10...10^2 \text{ м/с}$. Скорость бегущих страт рассчитывали путем определения расстояния смещения страты на двух соседних кадрах при известном промежутке времени смещения, равном $1/1\,200 \text{ с}$. Таким образом, скорость движения страты вычисляли по формуле: $v = l \cdot 1\,200$,

где l – расстояние, пройденное стратой за промежуток времени, равный $1/1\ 200$.

Типичный вид страты на выходе скоростной камеры представлен на рис. 3.



Рис. 3. Типичный вид страт, полученный с помощью скоростной видео-фотокамеры Casio Exilim Pro FX-1

Данный фотоснимок получен при использовании генератора шума ГШ-5. Угол наклона витков плазменного шнура в приведенной ре-

ализации составляет $20^\circ \dots 22^\circ$, что соответствует экспериментальным данным других авторов [2].

На рис. 4 представлены спектральные характеристики сигнала на выходе двухканального анализатора спектра, полученные в среде программы «Spectrolab» на персональной ЭВМ.

Приведенная реализация получена при следующих исходных данных экспериментальной установки: генератор шума ГШ-5; ток индикатора 90 мА; угол визирования $90^\circ \dots 27^\circ$. При этом в спектре присутствуют как амплитудная модуляция, так и фазовая. Доказательством этого, является зависимость спектральных характеристик отражений от плазменных образований при изменении угла визирования доплеровского локатора. Амплитудная модуляция в спектре сигнала практически не меняет своего положения при изменении угла визирования. Спектральные составляющие, вызванные фазовой модуляцией, сильно смещаются вдоль оси частот.

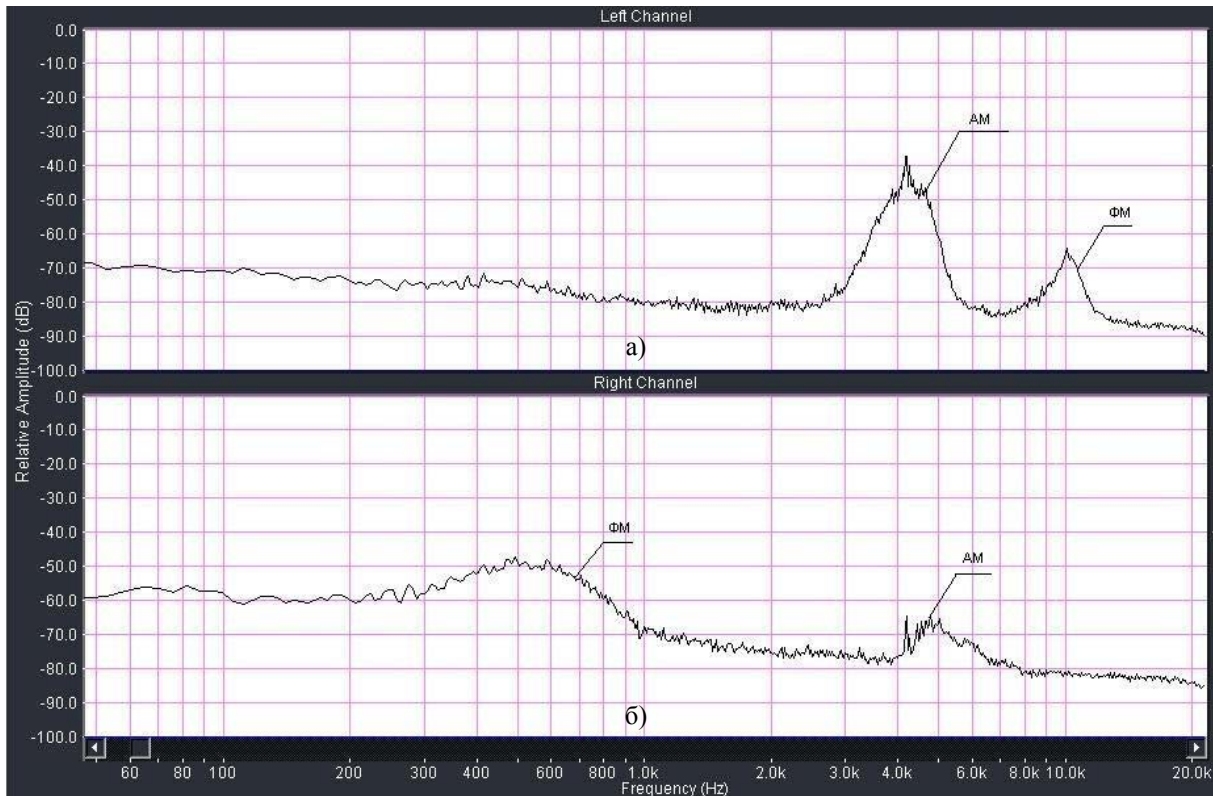


Рис. 4. Зависимость отраженного сигнала от ГШ при $I = 90$ мА, $\alpha = 10^\circ$: а) – на длине волны 8 мм; б) – на длине волны 3,2 см

Скорость изменения положения на оси доплеровских частот сигнала, полученного с 8-мм рупорной антенны, в 4 раза выше, чем с 3-см, что соответствует данным, полученным при использовании имитатора амплитудно-фазовой модуляции. Это является подтверждением того факта, что амплитудно-фазовая модуляция присутствует в опытах с генератором плазменных образований

ГШ и именно она фиксируется нашей экспериментальной установкой.

Проанализируем зависимость спектральных характеристик отражений от плазменных образований при изменении угла визирования. На рис. 5 приведена реализация линейчатого спектра, полученная при использовании тока питания ГШ на 20 % ниже номинального значения.

Если приведенный спектр сравнить с фотографией, полученной с помощью кинокамеры, можно отметить следующие особенности. При расположении луча доплеровского радиолокатора под углом $90^\circ + (20 \dots 25)^\circ$ возникает максимальная амплитуда отражений от плазменных образований. Это соответствует перпендикулярному расположению луча радиолокатора к виткам плазменного

шнура. При дальнейшем изменении угла визирования отражения от плазменного образования имеют ряд максимумов, меньших по амплитуде, чем при угле 110° . При угле 70° амплитуда меньше, чем при 110° и достигает максимума при угле 20° . Такая зависимость позволяет определить направление движения плазменных образований: от катода к аноду или наоборот.

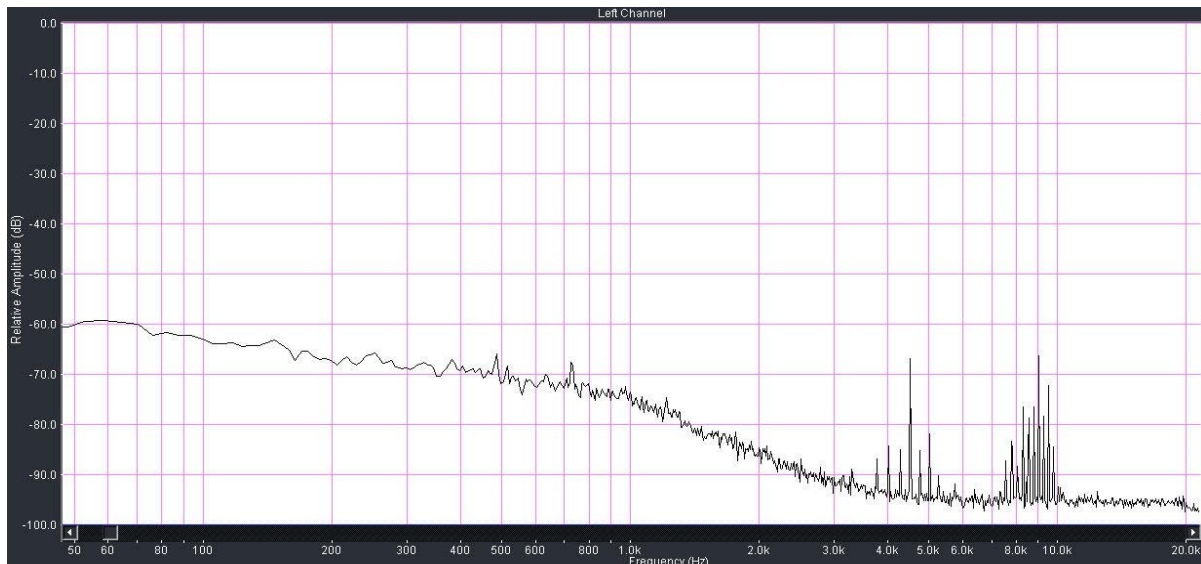


Рис. 5. Зависимость отраженного сигнала от ГШ при $I = 110$ мА, $\alpha = -24^\circ$ на длине волны $\lambda = 0,8$ см

Дальнейший анализ спектральных характеристик отраженного от плазменных образований сигнала показывает неустойчивость во времени спектральных характеристики эхо-сигналов от плазменных образований. Несмотря на принятые меры по стабилизации тока через ГШ, а также использование источников постоянного тока, форма спектров менялась во времени при неизменных условиях эксперимента. Это явление обусловлено разогревом стеклянной колбы ГШ.

На рис. 5 изображена зависимость отраженного сигнала от ГШ с двумя максимумами огибающей. Первый максимум приходится на частоту 4,5 кГц, второй – 9 кГц. Поскольку диаграмма доплеровского локатора облучала только часть электронного шнура плазменного образования, равную части представленной на рис. 3 ($l = 100$ мм), можно провести сопоставительные расчеты.

Частота первого максимума амплитудной модуляции может быть получена из внешнего вида структуры плазменного образования (см. рис. 3). Частота следований уплотнений на электронном шнуре равна 1 200 Гц, где 1 200 – количество кадров в секунду. Сдвиг максимума амплитудной модуляции равняется $1\,200 \times 3,5 = 4\,200$ Гц, где 3,5 – количество уплотнений, фиксируемых

кинокамерой в плазменном шнуре. Это близко к значению первого максимума в спектре амплитудной модуляции. На рис. 5 видно, что кроме первого максимума также существует и второй. Это позволяет предположить, что в радиолокационном изображении имеют место не только отражения от плазменного шнура с шагом 3,5 витка на полосу обзора, но и отражения сигнала от области, содержащей 7 витков, что соответствует доплеровскому сдвигу 8 400 Гц и полностью соотносится со вторым спектральным максимумом на рис. 5.

В реализации, приведенной на рис. 5, частота следования линий в спектре каждой из пачек равна 200 Гц, что указывает на наличие в плазменном шнуре витков с более крупным шагом и меньшей амплитудой, которые в меньшей мере модулирует СВЧ-сигнал. При изменении угла визирования спектральные линии с частотой следования 200 Гц меняются существенно, нередко сливаясь в сплошной спектр. Максимум в спектре с частотой 4,5 и 9 кГц фиксировался в опытах наиболее часто. Такая конфигурация спектра наблюдается при величине тока плазменного генератора шума, близкой к номинальному значению. Все это указывает на то, что радиолокационный сигнал является более информатив-

ным, чем оптический. Доплеровский локатор является удобным инструментом для анализа плазмы.

В процессе проведения опытов были использованы несколько типов генераторов шума, что позволило исследовать конфигурацию спектра при изменении плотности тока в плазменном генераторе шума. Номинальная плотность тока для приведенных генераторов шума следующая: ГШ-2 = 21,9 мА/мм, ГШ-3 = 7,5 мА/мм, ГШ-5 = 30,0 мА/мм, ГШ-6 = 17,5 мА/мм, ГШ-10 = 19,6 мА/мм, ГШ-11 = 21,0 мА/мм.

Максимальная амплитуда спектральных линий получена для двух длин волн на плазменном генераторе шума ГШ-5. При довольно большой плотности тока этот генератор имеет приемлемый размер плазменного образования (диаметр трубки генератора 2,0 мм). Плазменные генераторы типа ГШ-10, ГШ-11 обладают значительно более низкой плотностью тока при большем диаметре сечения трубки. В целом конфигурация спектра для всех шести исследуемых генераторов была идентична, за исключением амплитуды линий в спектре.

Проведенные измерения при вертикальной и горизонтальной поляризациях излучения не имели отличий в конфигурации спектров отраженных сигналов от страт.

Конфигурация спектров свидетельствует о том, что страты имеют форму, близкую к колоколообразным периодическим образованиям, поскольку временная реализация отраженного сигнала близка к синусоиде.

Выводы. В результате проведенных предварительных исследований плазменных образований типа страт на макете когерентной гомодинной приемо-передающей измерительной установки могут быть сделаны следующие выводы:

- Доплеровский локатор является хорошим инструментом для изучения плазменных образований, в частности страт. По данным радиолокационных наблюдений можно судить о форме страт, количестве плазменных образований, скорости их перемещения и интенсивности отражения от них.

- Отражения от плазменных образований типа страт в основном носят амплитудный характер. Наибольшей величины линии амплитудной модуляции достигают при угле визирования $(90 \pm 20)^\circ$. Максимальная амплитуда линии в спектре достигается при плотности тока в плазменном генераторе $I_{п.т.} = 25 \dots 30$ мА/мм.

- Фазовая модуляция от плазменных образований типа страт носит шумообразный характер, что говорит о значительно меньшей амплитуде и проявляется в основном при существенном уменьшении тока плазменного генератора.

- Максимальные значения амплитуды спектральных линий отраженного от плазменного образования типа страт сигнала достигаются при

плотности тока генератора $I = 100$ мА и диаметре плазменного столба 3,5 мм.

- Оценена эффективная поверхность рассеяния плазменных образований типа страты, которая достигает для волны $\lambda = 3,2$ см – $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, для волны 0,8 см – $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

- Оценены частотные особенности отражения сигнала от страты. Максимальные значения амплитуды отражения сигнала от страты получены на волне 0,8 см.

1. Чернетский А. В. Аппаратура и методы плазменных исследований / А. В. Чернетский, О. П. Зиновьев, О. В. Козлов. – М.: Атомиздат, 1965. – 364 с.
2. Недоспасов А. В. Страты / А. В. Недоспасов // Успехи физ. наук. – 1968. – 94, вып. 3. – С. 439–462.
3. Пекарек Л. Ионизационные волны (страты) в разрядной плазме / Л. Пекарек // Успехи физ. наук. – 1968. – 94, вып. 3. – С. 463–500.
4. Ланада Л. С. Ионизационные волны в низкотемпературной плазме / Л. С. Ланада, И. А. Мискинова, Ю. В. Пономарев // Успехи физ. наук. – 1980. – 132, вып. 4. – С. 601–637.
5. Обратное поле в сферических стратах / С. А. Новопашин, А. А. Поляков, В. В. Радченко, С. З. Сахапов // Письма в Журн. техн. физики. – 2007. – 33, вып. 5. – С. 25–30.

S. I. Khomenko, M. O. Khorunzhiy,
A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov

PLASMA FORMATION STRUCTURE INVESTIGATION BY DOPPLER RADAR METHOD

Stratified positive plasma column is studied using coherent homodyne receiving-transmitting measuring device. The estimation of effective scattering surface of plasma formation of stratified plasma column is given. Estimations of frequency peculiarities of signal scattering from stratified plasma, signal angle dependencies, scattering signal amplitude depending on discharge current and noise generator type have been presented.

Key words: Doppler radar, positive-column plasma, plasma-beam noise generator, two-channel transmitter-receiver of homodyne type, high-speed video capturing.

С. І. Хоменко, М. О. Хорунжий,
О. М. Кулешов, Б. П. Єфімов

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПЛАЗМОВИХ УТВОРЕНЬ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСЬКОЇ ЛОКАЦІЇ

На макеті когерентної гомодинної приймально-передавальної вимірювальної установки проведено дослідження плазмових утворень типу страт. Проаналізовано частотні особливості відбиття від страт, кутові залежності, амплітуда відбиття від страт у залежності від струму та типу генератора шуму. Оцінено ефективну поверхню розсіювання плазмових утворень типу страт.

Ключові слова: доплерівський локатор, позитивний стовп іонізованої плазми, страти, плазмово-променеви генератор шуму, двоканальний приймач-передавач гомодинного типу, швидкісна відеокамера.

Рукопись поступила 25.02.11 г.