

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ СРЕД ПУТЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.М. Сотников¹, А.Б. Гаврилов²

(¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, в/ч А0785)

Для неравновесного распределения электронной компоненты плазменной среды приводятся экспериментальные оценки ее поглощающих свойств, при концентрации заряженных частиц не менее 10^{16} 1/см³.

поглощающие свойства, плазменные среды, экспериментальная оценка, радиояркость температура

Постановка проблемы и анализ литературы. В работах [1 – 4] отмечаются высокие поглощающие свойства плазменных и плазмоподобных сред в широком частотном диапазоне. Для использования этих свойств и оценки возможности их применения, например, при разработке высокопоглощающих материалов [5 – 7] необходимо, наряду с теоретическими оценками, располагать экспериментальными данными, подтверждающими эти оценки и позволяющими определить условия возникновения поглощающих свойств.

В работе [3] указывается, что плазменный экран является широкодиапазонной поглощающей средой, у которой характеристики поглощения и затухания электромагнитных волн зависят от толщины слоя плазмы и плазменной частоты. При этом оценка поглощающих свойств проводилась на частотах 1, 3 и 10 ГГц.

На наш взгляд, интерес представляет оценка поглощающих свойств плазменной среды в более высокочастотном диапазоне, например, на наиболее часто используемых в радиотехнике и радиофизике частотах 37 ГГц и 94 ГГц. Кроме того, для ряда специальных задач вызывает интерес оценка излучательных свойств плазмоподобных сред на указанных частотах [6].

Поскольку для непрозрачных сред их излучательные свойства могут быть определены в соответствии с законом Кирхгофа на основании поглощающих свойств, то одним из способов определения поглощающих свойств является определение излучательных характеристик среды, которые могут быть определены путем измерения радиояркостной температуры непрозрач-

ной среды и непосредственно вычислением излучательной способности.

В связи с этим, **целью статьи** является экспериментальное определение радиояркой температуры плазменной среды.

Основная часть. Экспериментальное определение радиояркой температуры плазменной среды, обладающей высокими поглощающими свойствами, потребовало, в первую очередь, определение условия создания этих свойств. В работах [8, 9] показано, что в плазменных средах сильное поглощение электромагнитных волн (ЭМВ) в широком частотном диапазоне может быть обеспечено при соответствующих значениях их диэлектрической проницаемости, которая должна быть больше нуля и иметь мнимую часть одного порядка с вещественной. Реализация этого условия может быть обеспечена при соответствующей концентрации заряженных частиц и соответствующем соотношении рабочей и плазменной частот.

Диэлектрическая проницаемость плазменной среды может быть определена в соответствии с выражением [10]:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N}{m(\omega^2 + \nu_{ef}^2)} + j \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N \cdot \nu_{ef}}{\omega m(\omega^2 + \nu_{ef}^2)}, \quad (1)$$

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ к – заряд электрона; $m = 9,106 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; $N = \omega_p^2 \cdot m / e^2$ – концентрация электронов э/м^3 ; ν_{ef} – число столкновений электронов с ионами молекул в секунду; ω – угловая частота сигнала, рад/сек.

Поскольку высокие излучательные свойства среды, обеспечивающие высокие поглощающие свойства зависят от множества факторов, среди которых существенную роль, помимо диэлектрической и магнитной проницаемости, играют углы при которых выполняются измерения и учитывая необходимость обеспечения этих свойств в широком диапазоне изменения углов нами, на основании расчетной модели определения излучательных свойств материалов, приведенной в [11], получено выражение позволяющее установить взаимосвязь между определяемыми параметрами и условиями их создания. Подставляя выражение (1) в расчетную модель оценки излучательных свойств материалов [11] получим выражение, определяющее зависимость излучательной способности плазменной среды от угла визирования радиометра для соответствующей электронной концентрации.

$$\chi_p = 1 - \frac{\left| 1 - \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N}{m(\omega^2 + v_{ef}^2)} + j \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N \cdot v_{ef}}{\omega m(\omega^2 + v_{ef}^2)} \cos \theta - \sqrt{1 - \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N}{m(\omega^2 + v_{ef}^2)} + j \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N \cdot v_{ef}}{\omega m(\omega^2 + v_{ef}^2)} - \sin^2 \theta} \right|^2}{\left| 1 - \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N}{m(\omega^2 + v_{ef}^2)} + j \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N \cdot v_{ef}}{\omega m(\omega^2 + v_{ef}^2)} \cos \theta + \sqrt{1 - \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N}{m(\omega^2 + v_{ef}^2)} + j \frac{4\pi \cdot e^2 \cdot N \cdot v_{ef}}{\omega m(\omega^2 + v_{ef}^2)} - \sin^2 \theta} \right|^2}.$$

График зависимости излучательной способности плазменного образования от угла визирования радиометра для длин волн $\lambda = 8,6$ мм, $\lambda = 3,2$ мм и $\lambda = 1,2$ мм приведен на рис. 1.

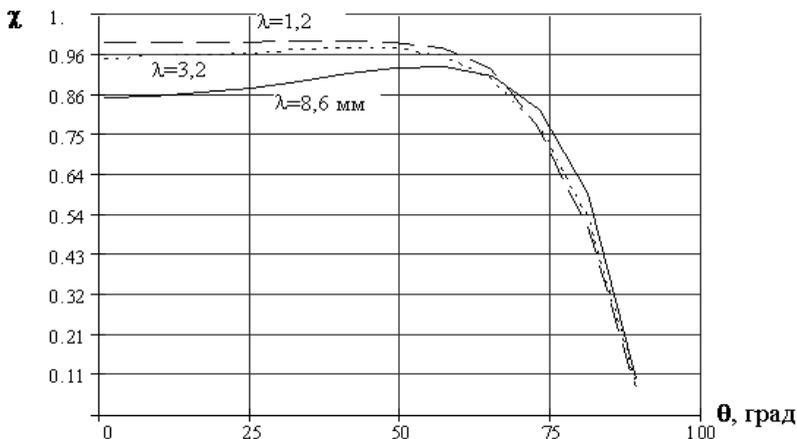


Рис. 1. График зависимости излучательной способности радиоизотопного покрытия от угла визирования радиометра

График на рис. 1 получен при значениях $\omega_p = 897,6$ рад/сек, $N = 2,858 \cdot 10^{16}$ 1/см³; $v_{ef} = 6 \cdot 10^3$.

Анализ приведенной зависимости показывает, что при концентрации заряженных частиц $N = 10^{16}$ 1/см³ излучательная способность плазменного образования в частотном диапазоне 37...150 ГГц лежит в пределах 0,86...0,96 при углах наблюдения 0 ... 55° от надира.

Для определения радиояркостной температуры плазменного образования использовался радиометрический комплекс со следующими характеристиками: тип приемника – модуляционный; рабочая частота фиксированная – 37,5 ГГц (длина волны 8,6 мм); уровень входного сигнала – 67 дБ; шумовая температура $T_{ш}$ – 400 К; нормированная флуктуационная чувствительность не менее 0,2 К/с; время анализа 0,1–0,3 с; ширина луча диаграммы направленности антенны (ДНА) ~10°; коэффициент направленного действия 15 дБ; уровень боковых лепестков – 20 дБ; поляризация антенны горизонтальная. Нормированная флуктуационная чувствитель-

ность 0,2 К/с обеспечивает погрешность измерений не более 15%.

При проведении эксперимента были выполнены следующие условия:

1. Расстояние от плазменного образования R до радиометра выбиралось из условия обеспечения дальней зоны ($R > D^2/\lambda$, где D – размер апертуры антенны, λ – длина волны). Поскольку размер апертуры рупорной антенны радиометра составляет 5 см, а $\lambda = 8,6$ мм, то $R = 3,4$ м.

2. Среда распространения электромагнитного излучения – свободное пространство.

3. Измерение радиояркостной температуры плазменного образования проводилось с момента подачи синхроимпульса на отпирающий вход модулятора радиометра.

4. Время существования плазменного образования составляло $(360...500) \cdot 10^{-3}$ сек.

5. В ходе измерений обеспечивалась полная развязка цепей электропитания сильноточного магнитоплазменного компрессора и измерительной аппаратуры (путем отключения от сетевого электропитания с использованием емкостного накопителя).

6. Обязательное заземление измерительной аппаратуры с применением дополнительной внешней экранировки.

7. Измерения проводились на поляризации ортогональной направлению разряда магнитоплазменного компрессора.

8. Измерение радиометром радиояркостной температуры проводилось в месте выброса из сопла плазменной пушки плазменного образования, в котором плазма имела неравновесное состояние электронной компоненты.

9. Термодинамическая температура плазменного образования T_0 на момент измерений составляла 350 К.

Для получения плазменного образования и измерения его радиояркостной температуры была собрана измерительная установка, в состав которой входят следующие составляющие.

1. Сильноточный торцевой магнитоплазменный компрессор (СТМПК). Основные характеристики СТМПК: возможности регулировок величины тока I – до 600 КА; возможности регулировок величины напряжения U – до 5 КВ. Поскольку измерения радиояркостной температуры плазменного образования проводились на частоте 37,5 ГГц, то для обеспечения необходимых излучательных свойств плазмы ее плотность должна быть не менее

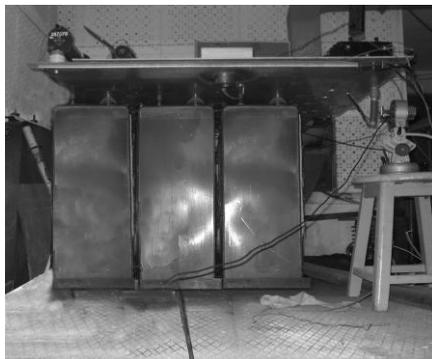


Рис. 2. Сильноточный торцевой магнитоплазменный компрессор

10^{16} $1/\text{см}^3$. Такая плотность плазмы обеспечивается при следующем режиме работы СТМПК [12]: величина тока разряда $I = 100$ КА, величина напряжения разряда $U = 2$ КВ. Внешний вид СТМПК представлен на рис. 2.

2. Радиометрический комплекс, в состав которого входят: приемная антенна; опорно-поворотное устройство; радиометрический (РМ) приемник; аналого-цифровой преобразователь; блок управления и синхронизации; регистрирующее устройство. Внешний вид радиометрического измерительного комплекса представлен на рис. 3.



Рис. 3. Измерительная установка для измерения эффективной радиояркой температуры плазменного образования на частоте 37,5 ГГц

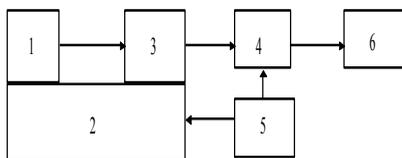


Рис. 4. Структурная схема РИК

миллиметрового диапазона волн представлена на рис. 4 (1 – приемная антенна; 2 – опорно-поворотное устройство; 3 – радиометрический (РМ) приемник; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – блок управления и синхронизации; 6 – регистрирующее устройство).

Блок управления и синхронизации задает режим работы радиометру и обеспечивает его синхронность работы с сильноточным торцевым магнитоплазменным компрессором в процессе измерения кажущейся радиояркой температуры плазмоподобной среды с возможностью регулировки времени задержки, отпирающего вход радиометра напряжения.

Для калибровки измерительного блока радиометра использовался метод измерения радиояркой температуры согласованной нагрузки при ее разных температурах. Сначала при температуре окружающей среды, измеренной термометром, а затем нагретой до температуры 98 °С, путем помещения согласованной нагрузки в резервуар с кипящей водой.

В СТМПК источником первичной ионизации служит плазменный канал, впрыскиваемый в разрядный промежуток через отверстие в основном электроде. Цилиндрическая камера основного электрода представляет собой плазменную пушку типа торцевого плазменного ускорителя [12]. В эксперименте, для получения требуемой концентрации элект-

тронов в плазменном образовании, выбраны следующие режимы работы для СТМПК: $I = 100 \text{ кА}$, $U = 2 \text{ кВ}$.

При этих параметрах обеспечивались следующие геометрические размеры плазменного образования (ПЛО): высота ПЛО $\sim 30 \text{ см}$; диаметр ПЛО $\sim 8 - 12 \text{ см}$. Функциональная схема измерительной установки для измерения эффективной радиояркой температуры плазменного образования



Рис. 5. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения эффективной радиояркой температуры плазменного образования

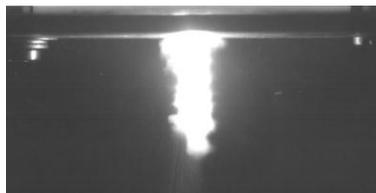


Рис. 6. Плазменное образование, полученное при помощи СТМПК

на частоте $37,5 \text{ ГГц}$ приведена на рис. 5. Внешний вид, сформированного в эксперименте плазменного образования представлен на рис. 6.

Радиояркая температура плазменного образования определялась после прекращения электромагнитного разряда СТМПУ, в соответствии с временной диаграммой, изображенной на рис. 7 (τ – время интегрирования (измерения радиометром)).



Рис. 7. Временная диаграмма проведения измерений

После завершения разряда (через 120 мкс после включения СТМПК) отпирался вход радиометра и, в течение установленного на блоке управления времени интегрирования, радиометр измерял радиояркую температуру плазменного образования. Проводились три серии измерений, по пять выстрелов СТМПК в каждой серии, при времени интегрирования $0,1 \text{ сек}$, $0,2$

сек, 0,3 сек с задержкой отпирающего вход радиометра напряжения, соответственно, 120 мкс. С учетом отсутствия подсветки атмосферы и ослабления радиотеплового излучения, излучательная способность плазменного образования определялась по формуле $\chi = T_{\text{яи}}/T_0$, где $T_{\text{яи}}$ – измеренная эффективная радиояркая температура плазменного образования; T_0 – термодинамическая температура плазменного образования. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений радиояркой температуры и оценки излучающих свойств плазменного образования

Время Интегрирования, τ , мс	Время задержки отпираания радиометра, с.	Концентрация заряженных частиц в плазме, $1/\text{см}^3$	$T_{\text{я}}$, К						χ	$f_{\text{г}}$, ГГц
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	$T_{\text{ср}}$		
100	$120 \cdot 10^{-6}$	Плазма, $N=10^{16}$	315	312	312	318	312	313,8	0,89	37,5
200	$120 \cdot 10^{-6}$	Плазма, $N=10^{16}$	300	305	300	308	305	303,6	0,86	37,5
300	$120 \cdot 10^{-6}$	Плазма, $N=10^{16}$	295	293	291	293	293	293	0,84	37,5

Обсуждение результатов эксперимента. Динамика изменения радиояркой температуры, на наш взгляд, связана с процессами релаксации, приводящими к уменьшению числа заряженных частиц, с одной стороны, а, с другой стороны, анализ пространственной динамики плазменного образования показывает, что вблизи сопла СТМПК концентрация заряженных частиц наиболее высокая, т.е. имеет место неравномерное распределение заряженных частиц по объему, которое можно интерпретировать как неравновесное распределение электронной компоненты среды. В соответствии с результатами работ [13, 14], такое неравновесное распределение заряженных частиц приводит к увеличению мнимой части диэлектрической проницаемости, которая может стать величиной одного порядка с действительной составляющей диэлектрической проницаемости. Как известно, наличие мнимой части диэлектрической проницаемости свидетельствует о формировании среды с высокими поглощающими свойствами (высокой излучательной способностью). Результаты выполненных нами оценок не противоречат результатам работ [13, 14].

Выводы. Таким образом, выполненные нами экспериментальные исследования позволяют судить о высоких поглощающих свойствах плазменной среды и в более высокочастотных диапазонах. Так на частоте 37,5 ГГц коэффициент поглощения плазмы лежит в пределах 0,84...0,89 при условии создания концентрации заряженных частиц не

менее 10^{16} 1/см³ и неравновесном распределении электронной компоненты плазменной среды. В совокупности с результатами работ [1, 3, 7] полученные нами результаты свидетельствуют о высоких поглощающих (излучательных) свойствах плазменной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 2. – С. 93 – 113.
2. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 3. – С. 71 – 92.
3. August H. Energy Adsorption By Radioisotope Produced Plasma. // USA, Pat'371357, 1974. – НКИ 343 – 18.
4. Коняхин Г.Ф., Мелашенко А.Ю. О результатах оценки радиопоглощающих свойств искусственных плазменных образований // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, НАНИ, ХВУ, 1999. – Вып. 1 (15). – С. 79 – 85.
5. Клевец С.И. Метод снижения заметности ЛА // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 6 (22). – С. 390 – 393.
6. Сотников А.М., Красношапка И.В., Гаврилов А.Б. Метод снижения радиометрической наблюдаемости наземных малоразмерных объектов // Системы обработки інформації. – Х.: ХУПС. – 2005. – Вып. 1. – С. 169 – 172.
7. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов: Монография. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. – 232 с.
8. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Применение композитных материалов нового типа для снижения радиолокационной заметности и радиометрической наблюдаемости // Проблеми інформатики і моделювання. Матеріали п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2005. – С. 49.
9. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот / О.М. Сотніков, В.І. Карпенко та інші. Декл. патент на корисну модель. – №7486 (H04K3/00). – 2005. – Бюл. № 6.
10. Гинзбург В.А. Распространение радиоволн в плазме. – М.: Физматлит. 1960. – 552 с.
11. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Оценка влияния условий визирования на характеристики излучательной способности различных поверхностей и покровов // Системы обработки інформації. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 2(42). – С. 177 – 182.
12. Чумаков В.И., Волколунов Ю.Я., Столярчук А.В. и др. Коммутатор с плазменной пушкой для сильноточной системы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 117. – С. 56 – 59.
13. Особенности электродинамических свойств фрактальных композитных материалов с α -радиоактивными включениями / А.М. Сотников, Г.Ф. Коняхин и др. // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 6 (22). – С. 142 – 154.
14. Влияние неравновесной плазмы на затухание электромагнитных волн. / Г.Ф. Коняхин, А.М. Сотников и др. // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 2 (18). – С. 221 – 224.

Поступила 19.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор Л.Ф. Купченко,
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.
