

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ ПРИ РАЗРЯДЕ В СИЛЬНОТОЧНОМ МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ КОМПРЕССОРЕ**

А.М. Сотников<sup>1</sup>, С.Н. Мещеряков<sup>1</sup>, А.Б. Гаврилов<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, <sup>2</sup>в/ч А-0785)

*Приводятся результаты экспериментальной оценки отражающих и поглощающих свойств плазмы с неравновесным распределением электронной компоненты.*

*экспериментальная оценка, электродинамические характеристики, неравновесная плазма, сильноточный магнитоплазменный компрессор*

**Постановка проблемы и анализ литературы.** В работах [1 – 4], посвященных исследованию электрофизических свойств плазмы, теоретически показана возможность повышения эффективности поглощающих свойств таких сред в широком частотном диапазоне на основе создания квазистационарных неравновесных состояний их электронной подсистемы. Для определения возможности использования этих свойств и оценки их применения, например, при разработке высокопоглощающих материалов [5 – 7] необходимо, наряду с теоретическими оценками, располагать экспериментальными данными, подтверждающими эти оценки и позволяющими установить условия высокого поглощения электромагнитных волн при их взаимодействии с такими средами. Однако, как показал анализ, в известной литературе отсутствуют необходимые экспериментальные данные, подтверждающие результаты теоретических оценок. Кроме того, представляет интерес изучение отражающих свойств высокоионизованных газовых сред с необходимыми электрофизическими свойствами, создание которых, как показано в работах [8 – 10], может быть использовано при практической реализации устройств защиты приемных трактов радиотехнических систем от мощных электромагнитных воздействий. В связи с этим, **целью статьи** является экспериментальное определение поглощающих свойств плазмы с квазистационарным неравновесным распределением электронной компоненты, а также оценка отражающих свойств плазмы при соответствующих значениях ее диэлектрической проницаемости.

**Основная часть.** Экспериментальное определение электродинамических характеристик плазменной среды, обладающей высокими поглощающими свойствами, потребовало, в первую очередь, определения условий

создания этих свойств. Это связано, прежде всего, с представлением источников и стоков в пространстве энергий. В ходе исследований источником первичной ионизации являлся плазменный канал сильноточного торцевого магнитоплазменного компрессора (СТМПК), имеющего возможность регулировки величины тока  $I$  – до 600 КА, а величины напряжения  $U$  – до 5 КВ. Измерения проводились на частотах 10 и 37,5 ГГц.

В эксперименте для получения требуемой начальной концентрации электронов в плазменном образовании использованы следующие режимы работы СТМПК: для  $N = 10^{14}$   $1/\text{см}^3$  –  $I = 100$  КА,  $U = 0,5$  КВ; для  $N = 10^{16}$   $1/\text{см}^3$  –  $I = 100$  КА,  $U = 2$  КВ. При этих параметрах геометрические размеры плазменного образования имели следующие значения:

- высота плазменного образования  $\sim 30$  см;
- диаметр плазменного образования  $\sim 8 - 12$  см.

Ввиду того, что время жизни плазменного образования в эксперименте составляло  $(360 \dots 500) \cdot 10^{-3}$  сек, по истечению которого наблюдалась полная релаксация ионизованной среды, то для определения влияния неравновесного состояния плазмы на ее поглощающие свойства за это время проводилась серия измерений напряжения отраженного излучения с последующим сравнением с результатами измерений напряжения отраженного излучения от металлического цилиндра, имеющего геометрические размеры, близкие к размерам плазменного образования. По разнице полученных значений уровней отраженного излучения оценивался коэффициент отражения плазменного образования.

Обобщенная функциональная схема измерительной установки для определения поглощающих свойств плазмы приведена на рис. 1, а ее внешний вид на рис. 2.

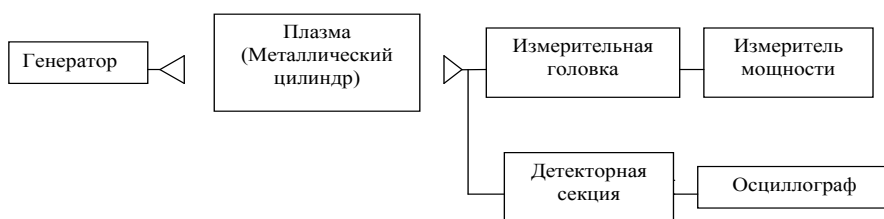


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема измерительной установки

При проведении эксперимента были выполнены следующие условия.

1. Расстояние от генератора до объекта зондирования  $R$  выбиралось из условия обеспечения дальней зоны ( $R > D^2/\lambda$ , где  $D$  – размер апертуры антенны;  $\lambda$  – длина волны).

2. Среда распространения электромагнитного излучения – свободное пространство.

3. Измерения электродинамических параметров (их качественного изменения) плазменного образования проводились с момента подачи синхроимпульса на запоминающий осциллограф.

4. В ходе измерений обеспечивалась полная развязка цепей электропитания СТМПК и измерительной аппаратуры (путем отключения от сетевого электропитания с использованием емкостного накопителя).

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

6. Измерения проводились на поляризации, ортогональной направлению разряда СТМПК.

7. Измерения проводились на участке развития плазменного образования, где степень неравновесности электронной компоненты наибольшая.

Внешний вид СТМПК представлен на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид функциональной схемы измерительной установки на частоте 37,5 ГГц

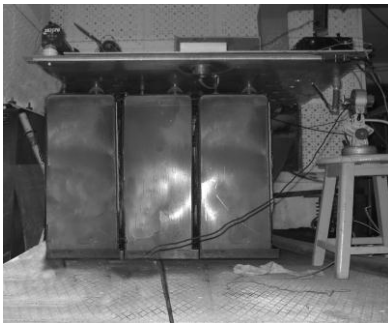


Рис. 3. Сильноточный торцевой магнитоплазменный компрессор

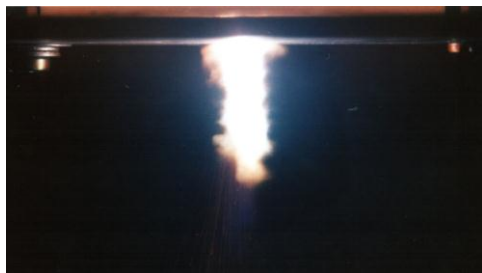


Рис. 4. Плазменное образование, формируемое СТМПК

Внешний вид, сформированного в эксперименте плазменного образования представлен на рис. 4.

Результаты измерений напряжения отраженного излучения от плазмы и металлического цилиндра приведены в табл. 1. Из результатов экспериментальных исследований видно, что величина

мощности отраженного сигнала от плазмы для обоих частот уменьшается не менее, чем на порядок.

Отражающие свойства плазмы исследовались на частоте  $f = 37,5$  ГГц.

Таблица 1

Результаты оценки поглощающих свойств плазменного образования

Х-ка среды	P <sub>отр</sub> , мкВт						Ud отр, мВ						f, ГГц
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>ср</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>ср</sub>	
металл. отражатель	23,0	23,3	23,2	23,4	23,2	23,22	15	15,1	15,15		15,1	15,11	37,5
Плазма N=10 <sup>15</sup>							1,49	1,5	1,54	15,2	1,51	1,51	37,5
металл. отражатель	260	268	263	267	263	264,2	220	223	221	221	222	221,4	10,0
Плазма N=10 <sup>13</sup>							25,4	25,1	25,3	25,5	25,4	25,3	10,0

Для исследования отражающих свойств плазмы был выбран следующий режим работы СТМПК: I = 200 КА, U = 4 КВ, что позволило получить требуемую концентрацию электронов в плазменном образовании –  $N = 10^{18} \text{ 1/см}^3$ . Такое значение N позволяет получить на частоте  $f = 37,5 \text{ ГГц}$  отрицательное значение диэлектрической проницаемости плазмы  $\epsilon$ .

Поскольку плазменное образование, формируемое СТМПК, приближенно имеет форму цилиндра, то для оценки его отражающих свойств также использован подход, основанный на предварительном моделировании плазменного образования металлической, цилиндрической, гладкой отражающей поверхностью, с целью определения уровня отраженного излучения с последующим сравнением результатов измерений, полученных при измерении уровня отраженного излучения от плазмы.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки отражающих свойств плазменного образования

Х-ка среды	P <sub>отр</sub> , мкВт						Ud отр, мВ						f, ГГц
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>ср</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>ср</sub>	
металл. отражатель	23,0	23,3	23,2	23,4	23,2	23,22	15	15,1	15,15	15,1	15,1	15,11	37,5
Плазма N=10 <sup>18</sup>							15	14,9	14,7	14,6	14,6	14,76	37,5

Таким образом, результаты оценки отражающих свойств плазменного образования показывают, что при концентрации электронов порядка  $10^{18} \text{ 1/см}^3$  в ММДВ обеспечивается непрохождение электромагнитно-

го воздействия, т.е. результаты экспериментальных исследований подтвердили полученные теоретические оценки.

**Обсуждение результатов эксперимента.** Динамика изменения значений уровней отраженного излучения, 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 [1 – 5], такое неравновесное распределение заряженных частиц приводит к увеличению мнимой части диэлектрической проницаемости, которая может стать величиной одного порядка с действительной составляющей диэлектрической проницаемости, т.е. создание квазистационарных неравновесных состояний электронной подсистемы может быть эффективно использовано для формирования плазменной среды с высокими поглощающими свойствами.

Повышение концентрации заряженных частиц до определенного значения приводит к отражению электромагнитного излучения от плазмы. Таким образом, при определенных значениях электрофизических параметров ионизованная среда может быть использована в защитных устройствах. Результаты выполненных нами экспериментальных оценок не противоречат результатам работ [1 – 5, 8 – 10].

**Выводы.** Таким образом, выполненные нами экспериментальные исследования подтверждают высокие поглощающие свойства плазменной среды с неравновесным состоянием ее электронной подсистемы. Показано, что на частотах 10 и 37,5 ГГц поглощающие свойства плазмы возрастают не менее чем на порядок.

Отражающие свойства ионизованной среды определяются ее электрофизическими характеристиками. Показано, что при отрицательных значениях диэлектрической проницаемости коэффициент отражения практически равен 1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Эволюция функции распределения электронов в твердотельной плазме к неравновесному стационарному состоянию.* / А.М. Сотников, Г.Ф. Коняхин, С.И. Клевец, В.В. Белимов, В.Е. Новиков // ИКСЗТ. Научно-технический журнал, 2002. – Вып. 3(36). – С. 62-65.
2. *Особенности электродинамических свойств фрактальных композитных материалов с  $\alpha$ -радиоактивными включениями.* / А.М. Сотников, Г.Ф. Коняхин, Г.В. Рыбалка, С.И. Кононенко, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко,

- В.Е. Новиков // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вып. 6(22). – С. 142-154.
3. Оценка макроскопических параметров твердотельной плазмы в полупроводнике. / Г.Ф. Коняхин, А.Ю. Мелашенко, А.М. Сотников, В.В. Белимов // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вып. 1(17). – С. 228-231.
  4. Влияние неравновесной плазмы на затухание электромагнитных волн / Г.Ф. Коняхин, А.Ю. Мелашенко, В.В. Белимов, В.Е. Новиков, А.М. Сотников // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вып. 2(18). – С. 221-224.
  5. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Применение композитных материалов нового типа для снижения радиолокационной заметности и радиометрической наблюдаемости. // Проблемы информатики і моделювання. Матеріали п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. – Х.: НТУ „ХПИ”, 2005. – С. 49.
  6. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот. / О.М. Сотніков, В.І. Карпенко, В.Ф. Клепиков, В.Є. Новіков, О.Г. Судаков // Деклараційний патент на рисунку модель. – № 7486 (H04K3/00). – 2005. – Бюл. № 6.
  7. Особенности электродинамических свойств фрактальных композитных материалов с  $\alpha$ -радиоактивными включениями. / А.М. Сотников, Г.Ф. Коняхин, Г.В. Рыбалка, С.И. Кононенко, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, В.Е. Новиков // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вып. 6(22). – С. 142-154.
  8. Коняхин Г.Ф., Сотников А.М., Литвина З.Ю. Устройство для защиты радиоэлектронной аппаратуры // АСУ та прилади автоматики. – Х.: Міністерство образования и науки Украины, ХНУРЕ, 2002. – Вып. 121. – С. 106-109.
  9. Мещеряков С.Н. Определение критерия пробоя в воздухе при прохождении через него электрического импульса. // Вестник НТУ „ХПИ”, 2004. – Вып. 47. – С. 91-97.
  10. Мещеряков С.Н. Метод защиты входных цепей приемных трактов бортовых радиоэлектронных систем от мощных СВЧ импульсных электромагнитных излучений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – 1/2(13). – С. 53-55.

Поступила 17.01.2006

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