

Плазменные антенны (теория и эксперимент)

А.А.Рухадзе, Н.Н.Богачев
Теоретический отдел ИОФ РАН

К.Ф. Сергейчев, Д.М. Карфидов,
Отдел физики плазмы ИОФ РАН

И.М.Минаев, О.В. Тихоневич
Отдел колебаний ИОФ РАН

В XXI веке наиболее острыми проблемами в развитии прикладных технологий и создании новых образцов военной техники являются снижение заметности стратегических и военных объектов в различных диапазонах волн, а также совершенствование защиты объектов в радиоэлектронной борьбе. Снижение заметности осуществляется в радио, инфракрасном, видимом и акустическом диапазонах волн. Однако наиболее важной считается задача снижения заметности в радиодиапазоне, поскольку радиолокационные средства обеспечивают в настоящее время наибольшую дальность обнаружения.

В комплексе мероприятий для снижения радиолокационной заметности наиболее сложными элементами являются антенны (антенны радиолокаторов, связные, станций радиоэлектронного противодействия и т.д.). В связи с этим остро возникает вопрос снижения эффективной поверхности рассеяния антенн без существенного ухудшения их характеристик.

Главными требованиями по снижению радиолокационной заметности антенных комплексов является:

- радиомаскировка антенных комплексов в режиме радиомолчания, с целью максимального снижения их заметности для радиолокаторов;
- быстрота, с которой станция может выходить на кратковременную связь или включать собственный радиолокатор, а также переходить в режим маскировки антенн при облучении средствами обнаружения.

Традиционные средства маскировки не могут быть использованы без ухудшения технических характеристик антенных систем. Одним из перспективных путей создания малозаметных быстро управляемых антенн является использование газовых разрядов для формирования плазменных проводников (плазменные антенны). Существуют несколько типов плазменных антенн, основанных на различных способах формирования и поддержания плазмы. Антенны с плазмой, создаваемой в газоразрядных трубках обладают рядом достоинств с точки зрения использования их для маскировки в радиолокационном диапазоне:

- близкая к нулю радиолокационная заметность в режиме радиомолчания;
- быстрое включение и почти безинерционное изменение параметров;
- возможность перестройки одной антенны на различные рабочие частоты.

Плазменные антенны, за счет того, что являются более широкополосными, чем металлические, могут более эффективно использоваться в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) как в режиме медленной, так и быстрой перестройки частоты, в особенности в КВ диапазоне. В КВ диапазоне плазменные антенны могут иметь меньшие размеры за счет того, что по плазменному каналу может пропускаться существенно больший ток, чем по металлической антенне, а длина антенны сокращается пропорционально квадрату тока (с сохранением мощности излучения).

Положение с исследованиями за рубежом

В настоящее время исследования, направленные на разработку плазменных антенн проводятся во многих странах.

В США (группа Алексеффа и Андерсона) и Австралии (группа Борга и Райнера) с конца 1990-х проводятся исследования по плазменным антеннам. В числе наиболее значимых работ – разработка плазменных коаксиальных кабелей и волноводов, разработка плазменных фазированных решеток, изготовление мощных плазменных антенн.

После 2000 года теоретические и экспериментальные работы по плазменным антеннам проводятся на Украине, в Индии, Иране и Китае.

Положения с исследованиями в России

С 2002 года в ИОФ РАН по грантам РФФИ 03-02-16993-а (2003-2005 гг.), РФФИ 13-02-00715 (2013-2015 гг.), РФФИ проект № 14-08-31336_мол_а и с 2005 года базовой кафедрой № 343 МГТУ МИРЭА совместно с Отделом физики плазмы, Отделом колебаний и Теоретическим отделом ИОФ РАН проводятся работы по теоретическим основам плазменных антенн, и экспериментальные исследования по плазменным антеннам, возбуждаемым собственным излучением передатчика, волноводно-щелевым антеннам с плазменным управлением диаграммой направленности, плазменным экранам на основе тлеющего разряда в диэлектрических трубках.

Вибраторные плазменные антенны, возбуждаемым собственным излучением передатчика

Вибраторные плазменные антенны отличаются от обычных вибраторных антенн тем, что металлический проводник заменяется плазмой в газоразрядной трубке. Проводимость газоразрядной плазмы оказывается достаточной для работы вибратора в ВЧ и СВЧ диапазонах.

В [1] впервые проведено исследование основных характеристик несимметричной приемной (передающей было проведено ранее в 2002-2009 гг.) плазменной вибраторной антенны таких как: диаграмма направленности, поляризационные и шумовые характеристики и сравнение этих характеристик с соответствующими характеристиками металлической антенны.

В работах [2,3,4,7,13] подробно освещены теоретические основы работы плазменных вибраторных антенн и показана возможность создания плазменных приемо-передающих антенн ВЧ и УКВ диапазонов. Теоретически [2,4,6,7,13], численно [10,14-16] и экспериментально [3,6-8] исследованы характеристики и роль поверхностных волн в создании, поддержании газового разряда и передачи сигналов. Развитые теоретические представления позволяют проводить оптимизацию параметров плазменных антенн в зависимости от предназначения. С помощью численного моделирования [9,10,14-16] и экспериментальных измерений [12] исследовались режимы работы, нелинейности и спектральные характеристик плазменной антенны.

Полученные результаты исследований показали:

- возможность создания высокоэффективной плазменной приемо-передающей антенны, работающей от одного источника ВЧ колебаний, который совмещает в себе функции как источника энергии для создания плазмы, поддерживаемой поверхностной волной, так и передатчика ВЧ сигнала;

- плазменный вибратор, создаваемый разрядом в трубке способен, включаться и выключаться за времена порядка микросекунд,
- что эффективность плазменных антенн близка к эффективности металлических антенн;
- возможность перестройки на несколько рабочих частот при изменении плотности плазмы.

Волноводно-щелевые антенны с управляемой диаграммой направленности

Диаграмму направленности волноводно-щелевых антенн можно изменять, меняя фазовую скорость объемной электромагнитной волны в волноводе. Это достигается введением внутрь волновода газоразрядной трубки с плазмой. Управляя разрядным током легко менять плотность плазмы и, тем самым, эффективную диэлектрическую проницаемость внутри волноводной области, в результате чего достигается управление диаграммой направленности.

Плазменные экраны

В работах [3,8] проведены исследования характеристик распадающейся плазмы сильноточного разряд в Ar-Hg смеси газов. На модели импульсного плазменного рефлектора из шести люминесцентных ламп проведен эксперимент по отражению СВЧ излучения с длиной волны 5 см ($f=6$ ГГц) от плазменного рефлектора. Полученные результаты показывают, что плазма с концентрацией более $4,46 \cdot 10^{11}$ см⁻³ существует в разрядных трубках в течение ~12 мс (при длительности импульса напряжения ~35 мкс). Уровень чувствительности принимающей плазменной антенны такого типа не хуже 10-12 Вт. В работе [8] показано изменение диаграммы отражения плазменного экрана при изменении плотности плазмы.

Заключение

Проведенные работы позволили построить теорию возбуждения и поддержания плазменного слоя поверхностными волнами. Определить роль поверхностных волн в формировании процесса излучения плазменной антенны. Проведено исследование электродинамических характеристик вибраторных приемо-передающих плазменных антенн, плазменных рефлекторных антенн, плазменных антенных решеток из линейки плазменных вибраторных антенн, волноводно-щелевых антенн с плазменным управлением диаграммой направленности. Полученные результаты показывают, что с помощью плазменных технологий могут быть созданы плазменные антенны и плазменные отражатели, которые могут найти применение при конструировании антенн радиолокаторов, связных станций, станций радиоэлектронного противодействия, радиоответчиков, радиолокационных ловушек и т.д.

Список опубликованных работ:

1. Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе К.З. / Плазменные приемные вибраторные антенны // Физика плазмы – 2010, Т. 36, № 10. - С. 972–974.
2. Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе К.З. / Физические принципы работы плазменных антенн // Краткие сообщения по физике ФИАН – 2011, №3, С. 42-49
3. Сергейчев К. Ф., Карфидов Д.М. / Распространение поверхностной свч-волны по плазменному столбу послесвечения сильноточного импульсного разряда // Физика плазмы – 2011, том 37, № 7, с. 1–10
4. Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе К.З. / Принципы работы плазменных антенн // Радиотехника и электроника. – 2011. Т. 56, № 10, С. 1216-1220.
5. Кузьмин Г. П., Минаев И. М., Рухадзе К. З., Тараканов В. П., Тихонович О. В. / Рефлекторные плазменные антенные решетки // Радиотехника и электроника – 2012, Том 57, № 5, стр. 590.
6. Коновалов В.Н., Кирсанов Н.А., Минаев И.М., Рухадзе А.А. / Условия существования поверхностных волн на границе плазма-диэлектрик в плазменных антеннах // Радиотехника – 2012, №10
7. Коновалов В.Н., Минаев И.М., Рухадзе А.А. / Плазменные вибраторные антенны, возбуждаемые собственным излучением передатчика // Инженерная физика – 2012, №11, стр 3-7.
8. Сергейчев К. Ф., Лукина Н.А., Фесенко А.А. / Долгоживущая Ag-Hg плазма в послесвечении импульсного разряда с большим током // Физика плазмы – 2012 , Т. 38 , № 12, стр.1-12
9. Богачев Н.Н, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Тараканов В.П. Моделирование ионизации плазменной вибраторной антенны, Тезисы XL Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Москва, февраль 2013, с. 269
10. Bogachev N.N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Tarakanov V. P. Computer simulation of a plasma vibrator antenna, Acta Polytechnica, Czech Republic, Prague, No 2, V. 53, p. 110–112, 2013.
11. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Сергейчев К.Ф., Тараканова Е.Н., Трефилов А.Ю. Заявка на патент № 2014106756 "Плазменная вибраторная антенна с ионизацией поверхностной волной ", 2014
12. В.Н.Коновалов, Г.П. Кузьмин, И.М. Минаев, О.В. Тихонович. Спектральные характеристики плазменных антенн. XLI международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы. 2014г.
13. И.М. Минаев, А.А. Рухадзе. Ионизация газа в поле поверхностной волны в цилиндрических каналах. XLI международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы. 2014 г.
14. Bogachev N.N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Sergeichev K.F., Operation modes and characteristics of plasma dipole antenna, Plasma physics and technology, V. 1, No 2, Prague, CTU, 2014, p. 83-84
15. Bogachev N.N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N.G., Ruhadze A.A. Surface wave and operation modes of plasma antenna, Contributed papers & abstracts of invited lectures, progress reports and workshop lectures of the 27th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, August 26-29, 2014, Belgrade, Serbia, p. 455-458
16. Богачев Н.Н, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. / Моделирование режимов работы плазменной антенны // Прикладная физика – 2014, № 4, с. 30-34.