

04;09;12

Аппаратура и экспериментальные исследования взрывных плазменных антенн

© А.Х. Аджиев,¹ В.А. Сошенко,² О.В. Сытник,² А.С. Тищенко²¹Высокогорный геофизический институт,
360030 Нальчик, Россия²Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
61085 Харьков, Украина
e-mail: ssvpll@ire.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 24 марта 2006 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований взрывных плазменных струй, формируемых в открытом пространстве. Показана возможность и изучены условия излучения импульсных электромагнитных сигналов плазменными струями. Проведен анализ результатов экспериментов с короткими и длинными плазменными струями. Зафиксировано кратковременное возрастание излученного сигнала при прохождении струи в поле спирали. Предложена линейно-параметрическая модель взаимодействия плазменной струи с возбуждающим электромагнитным сигналом. Даны характеристики разработанного комплекса измерительной аппаратуры для проведения исследований.

PACS: 84.40.Ba, 52.77.-j

Введение

Первым типом плазменных антенн по праву можно считать грозные молнии, в которых по проводящему каналу, образованному в атмосфере, протекает электрический ток, создавая в окружающем пространстве электромагнитные сигналы. Эти сигналы регистрировались еще на заре развития радиотехники — достаточно вспомнить грозоотметчик А.С. Попова.

Повышенный интерес к использованию плазменных сред в качестве антенн возник еще в 1960-х гг. прошлого столетия. Идея плазменных антенн основана на замене их элементов (вибраторов, рефлекторов) плазменными образованиями. Плазма может проявлять себя как металл или диэлектрик по отношению к электромагнитным волнам [1], что и используется для создания плазменных антенн. К настоящему времени в попытках реализации плазменных антенн можно выделить три направления:

- формирование проводящего канала, созданного в атмосфере, под воздействием ионизирующих излучений [2;3];
- использование плазмы, полученной в диэлектрических трубах [4–6];
- взрывные методы формирования плазменных струй в открытом пространстве [7,8].

В последнем направлении для создания плазменных струй используются продукты химических реакций, выносимые взрывом в свободное пространство.

Интерес к взрывным плазменным антеннам, невзирая на кратковременность их существования, обусловлен возможностью создания на их основе компактных взрывных источников электромагнитного сигнала [9,10], что позволяет исследовать физические процессы в верхних слоях атмосферы. В этом случае генератор сигналов размещается на геофизическом носителе [11], причем вме-

сто громоздких антенных конструкций целесообразно использовать струю маршевого двигателя носителя [12].

Экспериментальная аппаратура для формирования взрывной плазменной струи и исследования ее параметров

Для получения плазменных струй (ПС) в открытом пространстве используют генераторы ПС, наиболее существенный вклад в разработку которых был внесен Цикулиным [13], а затем в течение длительного времени подобные устройства разрабатывались Киселевым [14]. Основными достоинствами этих генераторов являются малые размеры и возможность оперативного изменения плазменного состава.

Авторами для получения ПС создан экспериментальный генератор, конструкция которого показана на рис. 1. Принцип работы генератора следующий: первичным источником энергии является пиропатрон 1, энергия которого определяется массой взрывчатого вещества (ВВ) с легкоионизирующимися добавками (Mg, Li,

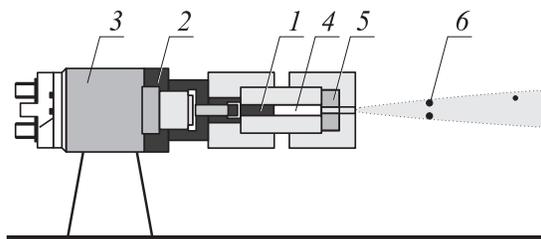


Рис. 1. Устройство генератора ПС.

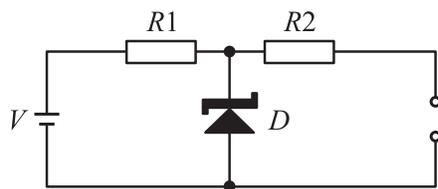


Рис. 2. Схема включения зонда.

CzNO₃ и др.) и составляет в наших экспериментах 0,6–3,1 кДж. Взрыв пиропатрона происходит под воздействием ударного механизма 2, управление которым осуществляется электромагнитом 3. Благодаря взрыву в камере сгорания 4 резко повышается температура, что приводит к образованию плазмы из частиц вещества и соединений, присутствующих в ней. Ударная волна и расширение газов приводят к выносу плазмы в окружающее пространство через сопло в шайбе 5. Выходное отверстие генератора выполнено в виде сопла Лавалля с диаметрами наименьшего сечения 2 и выходного отверстия 3 мм.

Для измерения характеристик ПС использовался зондовый метод [15,16]. Размещение зонда в ПС (6 на рис. 1) потребовало проведения дополнительных исследований с целью выбора оптимальной конфигурации электродов зонда, их размеров и способов крепления, устойчивых к воздействию ударных нагрузок. С этой целью были проведены предварительные испытания электродов различной конфигурации. Оказалось, что наилучшим вариантом является конструкция зонда, состоящая из двух параллельных проводников диаметром 0,15, расположенных на расстоянии 6 мм друг от друга. Такая конфигурация зонда оказалась оптимальной по стойкости к воздействию ударной нагрузки, что обеспечило повторяемость регистрируемых параметров. Электроды зонда были закреплены в жесткой рамке, а механическая развязка рамки и зонда осуществлялась с помощью пружин.

Электрическая схема включения зонда приведена на рис. 2. Она состоит из блока питания V , стабилитрона D и резисторов $R1$ и $R2$, первый из которых является нагрузкой зонда, а второй — токоограничивающим резистором стабилитрона D , аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и осциллографа.

Схема работает следующим образом. Напряжение с блока питания стабилизируется на уровне 5 В. Появление проводящей среды в межэлектродном промежутке зонда приводит к появлению тока зонда и соответствующему уменьшению напряжения на нем. Сигнал с зонда поступает на вход АЦП. Данные с выхода АЦП считываются компьютером и сохраняются в виде файла данных, что позволяет проводить дальнейшую обработку результатов измерений. Запоминающий осциллограф, подключенный параллельно АЦП, позволяет осуществлять оперативный контроль в процессе измерений.

Исследование параметров взрывных плазменных струй

На рис. 3 показана плазменная струя, формируемая взрывным генератором ПС. Визуально струя представляет собой столб пламени ярко желтого цвета длиной 60–80 см при диаметре средней части 15–20 см.

Средняя скорость ПС на выходе из сопла определялась по измеренному времени прохождения струей известного расстояния. В экспериментах временной интервал измерялся двумя способами. В первом случае использовались два взрывных ключа, один из которых устанавливался на срезе сопла, а второй располагался на расстоянии 1 мм позади него. Первый ключ при разрыве формирует импульс, запускающий развертку осциллографа, а второй, подавая напряжение на вход, позволяет производить отсчет времени распространения ПС. При втором способе измерения ключ заменялся пьезодатчиком, закрепленным на резиновых амортизаторах для механической развязки от металлических частей корпуса. Скорость струи, определенная первым способом, составила 560, а вторым — 600 м/с. Таким образом, разброс значений скорости струи, определенной этими способами, не превышает 40 м/с. Ориентируясь на среднее значение скорости ПС, принимаем для данной конструкции сопла и энергии пиропатрона скорость выхода струи в атмосферу приблизительно 580 м/с.

На рис. 4 представлены усредненные по результатам четырех экспериментов зависимости от времени тока зонда на оси ПС при различных расстояниях зонда от среза сопла. Усреднение позволило снизить уровень помех, обусловленных ударным воздействием струи на зонд. Очевидно, что параметры ПС при ее распространении в пространстве, претерпевают существенные изменения. Амплитуда тока при удалении зонда уменьшается с одновременным изменением формы импульса, что является следствием снижения концентрации заряженных частиц за счет их рекомбинации в процессе взаимодействия с окружающей средой. Изменение формы токов во времени свидетельствует о существовании в ПС нелинейных процессов, которые, по всей видимости, определяются развитием неустойчивости Релея–Тейлора [17,18].



Рис. 3. Фотография плазменной струи.

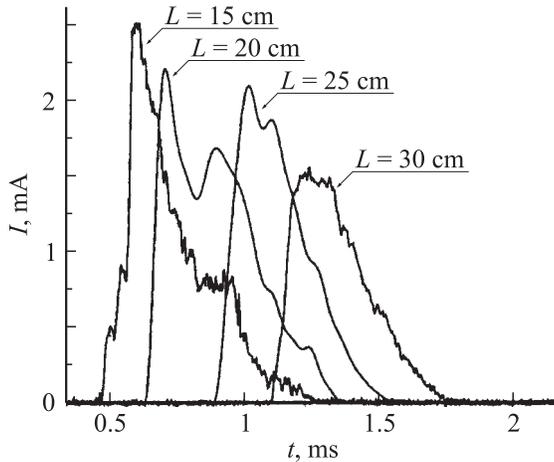


Рис. 4. Ток зонда при различном его удалении от среза сопла.

Незначительное временное перекрытие токов на расстояниях 15 и 30 см (рис. 4) свидетельствует, что длина активного участка ПС (области, проводимость которой отличается от проводимости окружающей среды) составляет приблизительно 15 см. Экспериментальные и теоретические исследования взрывных течений [15] показывают аналогичные результаты: увеличение энергии пиропатрона и внесение дополнительных добавок в состав заряда последнего позволяет увеличить ток в ПС в экспериментах на 40–50%.

Вычисление сопротивления межэлектродного промежутка зонда, удаленного на расстояние 15 см от среза сопла, показало, что сопротивление ПС изменяется во времени. Минимальное значение сопротивления межэлектродного промежутка зонда в опытах составило 930 Ω , а время, в течение которого это сопротивление составляет менее 1 к Ω , незначительно превышает 30 μ s. Методика определения удельной проводимости струи известна [15,16].

Расчеты показывают, что, согласно полученным экспериментальным данным, полное сопротивление струи составляет менее 1 Ω , что позволяет использовать ПС в качестве излучающих элементов в течение промежутка времени до 30 μ s.

Оценка концентрации полученных плазменных образований проводилась путем пересчета проводимости по методике Спитцера [19] для слабоионизированных плазменных образований, она показывает, что максимальная плотность частиц в ПС достигает 10^{12} см $^{-3}$.

Полученные в результате исследования параметров струи данные необходимы для изучения физических процессов, происходящих при возбуждении ПС электромагнитным полем.

Взаимодействие ПС с полем спирали

Для возбуждения поверхностной волны в ПС, которая имеет линейно-протяженную структуру, целесообразно

использовать системы с распределенными параметрами, например, спирали различных типов. С их помощью возможно возбуждение различных типов антенн [20,21]. В этом случае диаметр спирали D выбирают заведомо меньшей длины волны λ возбуждающего сигнала ($D < \lambda/\pi$). При выполнении этого условия спираль имеет большой коэффициент стоячей волны (КСВ), что приводит к установлению на поверхности провода спирали периодически чередующихся максимумов и минимумов поля. В объеме спирали также устанавливается соответствующее распределение амплитуды поля. Диаграмма направленности такой спирали имеет форму, подобную диаграмме направленности рамочной антенны, направленную перпендикулярно оси спирали.

Рассмотрев распространение ПС внутри спирали, к которой подведен сигнал от внешнего генератора, можно условно выделить три основные стадии развития процесса (рис. 5).

На первой стадии ПС поступает внутрь спирали и достигает положения первого максимума амплитуды поля, на второй струя распространяется внутри спирали, не выходя за ее пределы. Третья стадия начинается с момента выхода ПС за пределы спирали и дальнейшего ее распространения в свободном пространстве вплоть до ее исчезновения. Рассмотрим подробнее процессы взаимодействия ПС с полем спирали на первой стадии.

Ток зонда (рис. 4) пропорционален концентрации заряженных частиц в плазме и отражает закономерность поведения концентрации частиц во времени; следует учитывать, что плазменная частота также изменяется во времени

$$\omega_p(t) = \left(\frac{4\pi n(t)e^2}{m} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где $n(t)$ — закон изменения концентрации частиц во времени; e — заряд частицы; m — масса частицы.

Диэлектрическая проницаемость ПС связана с плазменной и рабочей частотами сигнала ω известным соотношением [1]

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует, что на первой стадии, когда концентрация частиц в ПС невысока, плазма ведет себя как диэлектрик. По мере заполнения внутреннего объема спирали плазмой происходит быстрое перераспределение максимумов тока за счет взаимодействия спирали и ПС. Это изменение в свою очередь является причиной излучения электромагнитного поля в пространство, амплитуда поля пропорциональна скорости изменения тока.



Рис. 5. Три основные стадии взаимодействия ПС с полем спирали.

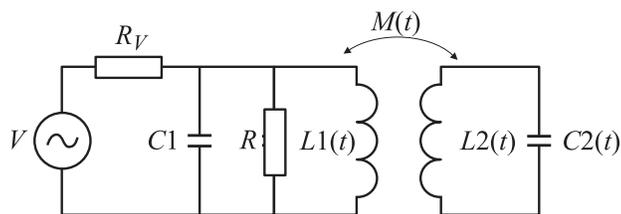


Рис. 6. Эквивалентная схема взаимодействия спирали с ПС.

Известно, что на границе плазмы возбуждается поверхностная волна [22]. Увеличение геометрической длины ПС соответственно приводит к увеличению энергии, отбираемой от спирали. Таким образом, на втором этапе происходит накопление электрической энергии в поверхностной волне ПС.

На третьем этапе плазма выходит из объема спирали в свободное пространство. Энергия, запасенная в поверхностной волне, излучается в открытое пространство.

Эти процессы можно представить с помощью феноменологической модели — метода эквивалентных схем (рис. 6).

Сигнал от внешнего генератора V с внутренним сопротивлением R_V поступает на параллельный контур $L1(t)C1$, который образован индуктивностью $L1(t)$ и емкостью $C1$ спирали. Колебательный контур, индуктивность $L2(t)$ и емкость $C2(t)$ которого изменяются во времени, предназначен для моделирования процессов взаимодействия ПС с полем спирали. Возбуждение контура $L2(t)C2(t)$ осуществляется посредством индуктивной связи $M(t)$, которая определяется длиной и положением ПС. Потери в контурах учитываются введением активного сопротивления R . Данная модель построена в линейно-параметрическом приближении.

Результаты моделирования показывают, что начальный ток спирали увеличивается с 1 до 50 А.

Экспериментальные исследования возбуждения плазменной струи электромагнитным сигналом

Для проведения экспериментальных исследований по возбуждению ПС электромагнитным полем был собран стенд. Основу стенда составляет генератор ПС. Создаваемая генератором струя проходит внутри спирали, намотанной на диэлектрическом каркасе. Диаметр, шаг и длина намотки спирали составляли 50, 10 и 280 мм соответственно. К спирали подводится сигнал от внешнего генератора мощностью 5 W и частотой от 360 до 520 МГц. Для измерения амплитуды электромагнитного поля использовались укороченные вибраторы, сигнал с которых поступал на детектор. На выход детектора подключено сопротивление нагрузки, напряжение с которой поступало на АЦП. Период дискретизации

АЦП составлял $3 \mu s$. Сопротивление нагрузки детектора в процессе исследований изменялось в пределах $1 k\Omega - 1 M\Omega$. В ряде экспериментов параллельно сопротивлению нагрузки детектора включался конденсатор емкостью 80–1000 pF, позволявший уменьшить уровень помех. Конструкция стенда позволяла проводить измерения распределения полей в пространстве и в объеме спирали.

При проведении экспериментов приемная антенна располагалась на расстоянии 30–150 см от спирали. В отсутствие ПС уровень сигнала на выходе детектора составлял 30–500 mV в зависимости от местоположения и ориентации приемной антенны. Отметим, что минимальный уровень сигнала на выходе детектора наблюдался при расположении приемной антенны на оси спирали, а максимальный соответствовал расположению приемной антенны перпендикулярно оси. При ортогональном расположении приемной антенны относительно оси ПС наблюдалось влияние струи на уровень принимаемого сигнала. В частности, был зафиксирован уровень сигнала на нагрузке порядка 19 V.

На рис. 7 показан выходной сигнал детектора при прохождении струи внутри спирали. Нагрузкой детектора было сопротивление $1 k\Omega$, параллельно которому включался конденсатор емкостью 80–240 pF. При прохождении струи внутри спирали выходной сигнал детектора уменьшался, что подтверждает справедливость рассмотренной модели взаимодействия ПС со спиралью.

Ввиду ограниченного времени дискретизации используемого АЦП не видны процессы длительностью меньше $6 \mu s$. Поэтому кратковременный выброс сигнала в 19 V на рис. 7 не виден. При выходе струи из объема спирали наблюдается, как и предполагалось, увеличение сигнала.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили достоверность предложенной модели.

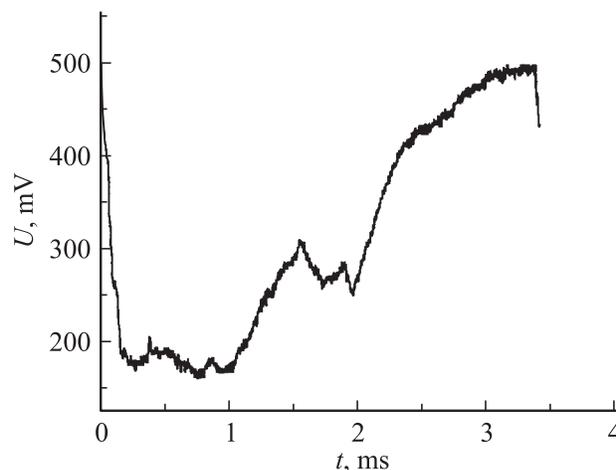


Рис. 7. Выходной сигнал детектора при прохождении ПС внутри спирали.

Заключение

Измерение параметров полученных плазменных струй показало, что заряд, энергия которого составляет приблизительно 1 кДж, позволяет формировать в открытом пространстве ПС плотностью 10^{12} см^{-3} . При этом активная длина струи (область с повышенной проводимостью) достигает 15 см.

Измерения показали резкую неоднородность скорости заряженных частиц по сечению струи. Концентрация частиц в струе максимальна по ее оси и спадает по сечению во времени.

При рассмотрении процессов, происходящих в системе „спираль—плазменная струя“, выделены три различные стадии, которые соответствуют различным положениям струи в объеме спирали.

1. При проведении экспериментальных исследований взаимодействия втуренного поля спирали с плазменным столбом было зафиксировано резкое увеличение амплитуды поля (20 дБ) в пределах диаграммы направленности спирали. Увеличение амплитуды обусловлено параметрическим механизмом взаимодействия внутреннего поля спирали с плазмой, вследствие чего происходит перераспределение электромагнитной энергии, запасенной в объеме спирали.

2. При выходе струи за пределы спирали было отмечено увеличение амплитудного электромагнитного поля, вызванное излучением плазменного столба.

Предложена линейно-параметрическая модель взаимодействия ПС с возбуждающей ее спиралью, которая позволяет оценить характер этих процессов.

Список литературы

- [1] Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975.
- [2] Vail J.R. Laser beam techniques. U.S. Patent 3719 829. 1973.
- [3] Tidman D.A. Establishing highly conductive path in gas by thermal guidance of discharge. U.S. Patent 3 775 638. 1973.
- [4] Auishehenko Yu.V. // Plasma oscillations and waves. 1997. Vol. 23. N 12. P. 1000–1006.
- [5] Borg G.G. and Harris J.H. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. N 22. P. 3272–3274.
- [6] Rayner J.Ph., Whichello A.Ph. // IEEE Trans. on Plasma S. 2004. Vol. 32. N 1. P. 269–281.
- [7] Сильков В.В., Сошенко В.А., Новиков В.Е. // XIII Междунар. крымская конф. по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям. Севастополь, 2003. С. 609–611.
- [8] Novikov V.E., Puzanov O.O., Sin'kov V.V., Soshenko V.A. // Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques Proc. Sevastopol, 2003. P. 692–695.
- [9] Сошенко В.А., Сытник О.В., Тищенко А.С. // II Междунар. радиэлектронный форум „Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития“ (МРФ 2005). Харьков, 2005. С. 121–124.
- [10] Загвоздкин Б.В., Сильков В.В., Сошенко В.А. // XIII Междунар. крымская конф. по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям. Севастополь, 2003. С. 606–608.

- [11] Puzanov O.O., Soshenko V.A. // Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals Proc. Sevastopol, 2004. P. 290–292.
- [12] Аджиев А.Х., Гончаров В.М., Тищенко А.С., Сошенко В.А., Сытник О.В. // Тез. Докл. 15-й Междунар. крымской конф. по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям. Севастополь, 2005. С. 691–694.
- [13] Цикулин М.А., Попов Е.Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. М.: Наука, 1977.
- [14] Фортвов Е.В. Низкотемпературная плазма. Энциклопедия. Т. 2. М.: Наука, 2000.
- [15] Фортвов Е.В. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока. М.: Наука, 2002.
- [16] Минцев Б.В., Фортвов Е.В., Павлов Г.А., Грязнов В.К. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 4. С. 234–237.
- [17] Анисимов С.И., Зельдович Я.Б. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 20. С. 1081–1084.
- [18] Абрамова К.В., Златин Н.А., Перегуд Б.П. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. № 6. С. 2007–2022.
- [19] Спитцер Л. Физика полностью ионизированной плазмы. М.: Мир, 1965.
- [20] Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Сов. радио, 1974.
- [21] Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
- [22] Бернашевский Г.А., Чернов Э.С. Колебания сверхвысоких частот в плазме. М.: ИЛ, 1961.