

*Б. П. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, А. Н. КУЛЕШОВ, канд. физ.-мат. наук,  
А. О. ПУЗАНОВ, канд. физ.-мат. наук, М. О. ХОРУНЖИЙ*

### **ФАКЕЛЬНЫЙ СВЧ РАЗРЯД В ОДНОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Существование поверхностных электромагнитных волн в линиях передачи показано в ряде теоретических работ, опубликованных в начале прошлого века. В то время решались задачи распространения радиоволн вдоль поверхности диэлектрической среды с потерями. Теоретически было установлено, что амплитуда поверхностных волн экспоненциально убывает с расстоянием от поверхности как вглубь диэлектрика, так и в сторону граничащего с нею вакуума. Было показано, что на границе двух изотропных сред поверхностные волны возбуждаются при условии, если хотя бы одна из смежных сред обладает отрицательной диэлектрической или магнитной проницаемостью. Наибольший вклад в решение этих задач внесли Арнольд Зоммерфельд [1] и Дж. Ценнек [2].

В последние годы возрос интерес к освоению терагерцевого диапазона частот – одного из интенсивно развивающихся направлений современной прикладной радиофизики [1 – 8]. В большинстве случаев при разработке теоретических моделей и при постановке экспериментов используют результаты, относящиеся к световому и инфракрасному диапазонам частот, тогда как длинноволновым участкам спектра, в частности сантиметровому диапазону длин волн, уделяется недостаточно внимания. Исследования распространения поверхностных волн в этом диапазоне частот расширяют физические представления об особенностях передачи СВЧ энергии в линиях передачи и позволяют найти новые области применения волноводов поверхностных волн.

Анализ распространения электромагнитных волн в однопроводной линии приводит к рассмотрению поверхностных волн Зоммерфельда – Ценнека (Sommerfeld – Zenneck) [1, 8]. Потери в однопроводных линиях обусловлены омическими потерями в скин-слое и излучением. В частности, на неоднородностях волноведущего тракта происходит трансформация поверхностной волны в объемное излучение. Дополнительные потери возникают при наличии диэлектрического или полупроводникового (оксидного) покрытия металлических проводников.

Этим вопросам уделено внимание в работах [9, 10], в которых исследованы поверхностные волны в однопроводной линии и предложены возможные области ее использования. В частности, были проанализированы режимы, при которых в линии происходит СВЧ пробой и возникает эрозионный факельный разряд.

Существует множество способов возбуждения СВЧ разрядов под воздействием электромагнитной волны, например, в волноводах, в вакуумных резонаторах или в трубках с газовым наполнением. Для инициирования СВЧ разрядов используются диэлектрические линзовые концентраторы полей, внешние источники ионизирующего излучения и пучки свободных электронов [11 – 13].

Исследованиям свойств разрядов в газовых средах при различных давлениях посвящена серия наших работ. В их числе: создание установки для возбуждения факельного разряда в открытом воздушном пространстве под воздействием СВЧ энергии, оптимизация отдельных узлов установки – волноводной и коаксиальной линий, возбуждение факельного разряда на конце однопроводной линии, исследование свойств эрозионного факельного разряда и особенностей передачи в него энергии по однопроводной линии.

В близкой постановке в работе [14] рассматривался разряд, инициированный на конце антенны типа несимметричного четвертьволнового вибратора (внутренний проводник коаксиала выступал наружу на четверть длины волны). Вибратор был помещен в струю аргона, вытекающего в свободное пространство из коаксиального трехсантиметрового СВЧ плазмотрона. Был возбужден факельный разряд, радиус сферы которого сравним с глубиной скин-

слоя. Этот разряд трактовался авторами работы как «огонь святого Эльма», что вступает в противоречие с общепринятой терминологией, согласно которой называемое так свечение наблюдается в статических полях атмосферного электричества.

В [15] описан шаровой СВЧ разряд, инициированный генератором на частоте 2,45 ГГц. Разряд возникал на конце антенны в металлической камере, размеры которой существенно превосходили объем светящейся области плазмы. Утверждается, что структура поля на поверхности разряда соответствует поверхностной волне. Как следует из этой работы, вид разряда и его форма существенно зависят от параметров возбуждаемого СВЧ контура – связанной СВЧ системы, включающей в себя камеры, линии передачи, подстроечные поршни и пр.

Данная работа является логическим продолжением экспериментальных исследований свойств поверхностных электромагнитных волн при помощи специально разработанного нами устройства – волноводного СВЧ модуля с рабочей длиной волны 12 см. Модуль возбуждает отрезок однопроводной линии, расположенной вертикально. Система может работать в двух режимах: как штыревая антенна (назовем этот режим докритическим – по уровню подводимой СВЧ мощности) и в режиме поверхностных волн с образованием факельного разряда – когда СВЧ мощность превышает пороговое значение, вследствие чего и возникает пробой. Дальнейшим исследованиям факельного разряда и посвящена настоящая работа.

### Описание установки (СВЧ модуля)

Схема разработанной нами СВЧ установки представлена на рис. 1. Генератор 1 – промышленный магнетрон М105 непрерывного действия с выходной мощностью порядка 700 Вт и длиной волны 12 см. Через П-образную диафрагму (окно связи) возбуждается резонатор, представляющий собою отрезок прямоугольного волновода 2 сечением 90х45 мм<sup>2</sup>. Волновод коротко замкнут подвижным поршнем 3 с противоположной стороны волновода. Нижняя (широкая) стенка резонатора выполнена в виде усеченной пирамиды. Ее образующая плавно уменьшает сечение волновода вдоль его узкой стенки с 45 до 25 мм. Это обеспечивает согласование и снижение уровня вносимых потерь. С широкой стенкой

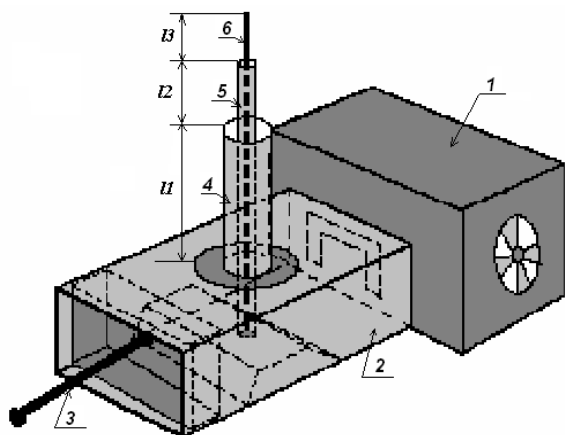


Рис. 1

прямоугольного резонатора соединяется отрезок коаксиальной линии 4 длиной  $l_1$ . Ее внутренний проводник 5 длиной  $l_2$  переходит в однопроводную линию 6 длиной  $l_3$ . С помощью согласующих диафрагм и подвижного поршня, а также путем подбора величин  $l_1$  и  $l_2$  достигается режим максимальной передачи СВЧ мощности от генератора в линию.

Согласующая диафрагма в прямоугольном волноводе изначально была классической – прямоугольной. Однако впоследствии, во избежание электрического пробоя внутри щели, диафрагма была заменена на П-образную. Это,

как показано в работе [16], обеспечило такой же коэффициент связи, но с большим (в несколько раз) зазором щели.

Для удобства внешняя оболочка коаксиальной линии 4 (рис. 1) впоследствии была нами вовсе удалена, а ее внутренний проводник 5 (медная трубка внешним диаметром 3 мм) телескопически соединен с вольфрамовым проводником 6 через круглое окно связи в волноводе 2. Это позволило добиться жесткости конструкции в сочетании с простотой изменения длины и формы проводника линии.

Для возбуждения факельного разряда необходимо, чтобы величина модуля электрической компоненты электромагнитной волны  $E_0$  (В/см) превышала пробойное значение. Поэтому внутренний проводник коаксиальной линии помещен внутрь волновода до контакта

с его широкой стенкой. Это позволило существенно увеличить напряженность поля на конце линии.

В качестве материала линии нами использовались различные металлы, в том числе тугоплавкие (температуры плавления даны в скобках): W (3380° С); Ta (3000° С); Mo (2623° С); Ni (1455° С); Cu (1083,4° С) и др. Основная часть наших экспериментов проводилась с вольфрамом и медью. Для вольфрама температура кипения составляет 5930° С, теплота испарения – 1183 кал/грамм, а удельное сопротивление –  $5,1 \cdot 10^8$  Ом·м.

Результаты экспериментов показали, что условия возникновения факельного разряда в атмосфере определяются, прежде всего, свойствами металла и, в частности, температурой его плавления. Чем последняя выше, тем большую СВЧ мощность необходимо ввести в линию от магнетрона. От материала проводника линии зависит цвет разряда: красноватый для меди, белый – для вольфрама.

В момент выключения установки на конце линии, как правило, образуется «капля» окисла в форме шарика. Перед повторным возбуждением СВЧ разряда «каплю» необходимо удалить. Чем выше температура плавления материала проводника, тем меньшим оказывается диаметр «капли».

Визуальное наблюдение плазмоида возможно только с использованием светофильтров. Для кинетографии разрядного процесса нами используется светофильтр ФС-6 с толщиной стекла в 1 мм. В диапазоне длин волн 240 – 480  $\mu\text{m}$ , 750  $\mu\text{m}$  и выше его показатель поглощения  $K_\lambda$  составляет 0,32-0,05, а в диапазоне 500 – 700  $\mu\text{m}$  – от 1,49 до 1,54.

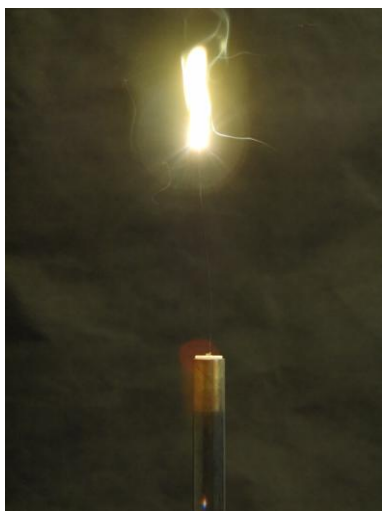


Рис. 2

На рис. 2 показан кадр видеозаписи типичного разряда, возбужденного в воздухе при помощи описанного СВЧ модуля. Следует отметить, что материал проводника расходится весьма быстро; в наших экспериментах скорость его сгорания составляла порядка 1 см/мин.

Температура факельного разряда может быть измерена двумя методами: пирометрическим и методом обращения спектральных линий.

На основании опытных данных установлено, что разряд создает существенные шумовые помехи в сантиметровом, световом и промежуточном диапазонах. В связи с этим применение метода обращения спектральных линий при использовании монохроматора становится затруднительным. Поэтому для измерений нами применен лабораторный оптический пирометр ЭОП-66, построенный по классической схеме с исчезающей нитью накала. Он позволяет проводить измерение яркостных температур по тепловому излучению в видимой части спектра на длине волны 0,65  $\mu\text{m}$ . Благодаря поглощающим стеклам, диапазон измеряемых температур прибора простирается вплоть до 10 000° С. Поскольку градуировка пирометра производится по излучению черного тела, то измеряемая так называемая яркостная температура в действительности оказывается несколько ниже истинной: ввиду того, что степень черноты  $\epsilon_{\lambda, n}(T)$  меньше единицы, тепловое излучение оказывается меньшим. Температура спирального вольфрамового проводника, измеренная оптическим пирометром ЭОП-66, составила 2000° С.

В эксперименте были опробованы несколько конфигураций проводника б: «крючок», «синусоида», спираль, «зигзаг». Поджечь разряд удавалось для всех перечисленных форм проводника. Особый интерес, на наш взгляд, представляет проводник, свитый в спираль. С его помощью в линии можно возбудить поверхностную волну до появления факельного разряда. В этом случае электромагнитное поле распространяется вдоль оси волноведущей структуры, и поэтому добиться возникновения факельного разряда по энергозатратам становится значительно легче.

Тип разряда чаще всего относится к эрозионному. Металл проводника под действием высокой температуры испаряется в атмосферу, минуя жидкую фазу. Этот процесс известен из литературы [17], как резистивное распыление. Если оно осуществляется в воздухе или кислороде, то часть распыленного соединения составляет окисел. Описанный метод распыления примечателен простотой и возможностью создания с его помощью тонких пленок на подложках. Это качественные мелкодисперсные покрытия. Их полезные свойства определяются особенностями напыляемых металлов и/или образовавшихся из них окислов.

Для получения чистой от окислов металлической пленки напыление можно осуществлять, например в среде азота. Хорошая адгезия достигается путем подбора материала подложки для конкретного сорта распыляемого материала.

### **Особенности передачи СВЧ энергии по однопроводной линии и явление пробоя**

До возникновения факельного разряда однопроводную линию можно рассматривать как штыревую антенну – несимметричный вибратор [7]. Этот случай имеет место, когда подводимой от магнетрона СВЧ мощности недостаточно для возникновения пробоя. Но однопроводная линия может работать и в режиме передачи поверхностных волн, когда СВЧ мощность превышает пробойное значение и на конце проводника возникает факельный разряд.

Важную роль играет пространственное расположение линии, а также ее согласование с источником возбуждения – СВЧ генератором. В нашем случае линия одним концом соединена с широкой стенкой волновода и возбуждается электрической компонентой электромагнитного поля. Согласование с волноводом осуществляется через отрезок коаксиальной линии, проходящей через окно связи. Увеличение или уменьшение электрической длины линии может быть скомпенсировано согласующими элементами – катушками индуктивности или конденсаторами. Если длина проводника составляет несколько четвертей длины волны, то диаграмма направленности (ДН) имеет многолепестковую форму; вид ДН также зависит от высоты расположения антенны по отношению к земле.

Для возбуждения на конце линии СВЧ разряда к ней необходимо подвести достаточный уровень мощности. Этого можно добиться путем подбора:

- режима работы магнетрона (одно- или двухполупериодный);
- размера окна связи с нагрузкой;
- фазы стоячей волны в волноводе с помощью короткозамыкающего поршня;
- диаметра провода линии.

Максимально допустимая для фидера мощность определяется электрической прочностью изоляторов и воздуха (при конкретной влажности и температуре окружающей среды). Как только напряженность поля превзойдет допустимое значение (обычно  $\approx 30$  кВ/см), воздух начинает ионизироваться и происходит электрический пробой. Заметим также, что пробойная напряженность поля зависит от частоты. Допустимой для линии передачи принята амплитуда напряженности поля  $E_a = 6-7$  кВ/см.

Суть явления пробоя состоит в следующем. Вблизи поверхности проводников находятся свободные электроны. Чем выше напряженность поля у поверхности проводника, тем выше скорости электронов. Поэтому при больших напряженностях поля ионизация нейтральных молекул воздуха происходит чаще: электроны выбиваются из своих орбит, что способствует ускорению ионизации. Положительные ионы, обладающие избытком положительных зарядов, в результате бомбардировки отрицательно заряженного проводника инициируют новый приток электронов с поверхности проводников в воздух. По этой причине, а также вследствие непосредственного воздействия ионов на нейтральные частицы ионизация снова дополнительно возрастает [19].

Ионизацию сопровождает процесс рекомбинации и отчасти рассеяние свободных заряженных частиц. При малой напряженности поля начавшийся процесс ионизации быстро прекращается. Большие напряженности поля, напротив, ионизацию поддерживают, и тогда в воздухе, окружающем проводник, возникают стабильные объемы ионизированного воздуха.

Ионизация молекул сопровождается излучением электромагнитных волн оптического диапазона, а ионизированный объем воздуха начинает светиться [19].

В однопроводной линии подводимая энергия перераспределяется между объемными волнами, излучаемыми в окружающее пространство, и поверхностными волнами в линии как волноведущей структуре.

В однопроводной линии распространяются частично продольные [21] электромагнитные волны ТМ-типа, или поверхностные волны Зоммерфельда ([20, § 62; 21 – 23]). Эти волны могут быть возбуждены на границе диэлектрика и поверхностно-активной среды (в частности, металла) с отрицательной диэлектрической проницаемостью, большей по модулю, чем у диэлектрика [20 – 23]. Электромагнитное поле поверхностных волн неразрывно связано со свободными носителями заряда в поверхностно-активной среде [21 – 23], которая играет роль открытого волновода. Важной особенностью этих волн является наличие продольной компоненты вектора электрического поля, благодаря которой энергия циркулирует через границу раздела [23] из одной среды в другую. Затухание поверхностных волн в граничащих средах может быть недиссипативным, то есть обусловлено не потерями энергии вследствие поглощения, а «вытеснением» поля волны [23] из объема сред к поверхности раздела.

Теория поверхностных волн построена Зоммерфельдом в предположении, что волна возбуждается неким сторонним источником при том, что проводник линии имеет бесконечную длину и находится в пустоте. Однако в действительности мы имеем дело не с абстракцией, а с однопроводной линией конечной длины, расположенной на некотором расстоянии от поверхности земли и в окружении прочих проводящих поверхностей. Это свидетельствует о присутствии емкостной связи с землей (или корпусом СВЧ модуля), то есть наличии потерь на излучение.

В радио- и СВЧ диапазонах фазовая скорость поверхностных волн, распространяющихся по поверхности металла, близка к скорости света, а потери в скин-слое весьма малы. Поэтому в этих диапазонах частот поверхностные волны распространяются на значительные расстояния и испытывают весьма малое замедление, причем поперечная компонента в электрическом поле доминирует. Это случай так называемого *фотоноподобного возбуждения*, когда дисперсионная кривая близка к световой линии [22].

Зоммерфельд установил [20, § 62], что на частоте 1 ГГц ( $\lambda = 30$  см) продольное волновое число  $h$  волны, распространяющейся вдоль медного провода радиуса 1 мм, имеет значение  $h = k[1 + (6 + i6,4) \cdot 10^{-5}]$ , где  $k = \omega/c$  - волновое число фотона. Из этого примера видно, что в сантиметровом диапазоне длин волн фазовая скорость поверхностных волн очень мало отличается от скорости света, а затухание вдоль проводника чрезвычайно мало. По значению мнимой части  $h$  можно определить расстояние (отсчитываемое вдоль оси проводника), на котором амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз.

Поперечное волновое число показывает скорость радиального убывания поля. Однако на практике целесообразнее использовать значение радиуса  $r(P/P_0)$  цилиндра, коаксиального проводу [20, § 62], через поперечное сечение которого проходит заданная часть  $P/P_0$  полной мощности поверхностной волны  $P_0$ . Результаты расчетов значений  $r(P/P_0)$  для медных проводников радиусов  $a = 1$  мм и  $a = 5$  мм приведены в монографии Л.А. Вайнштейна [20, § 62]. Из этих расчетов следует, что в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн радиальная протяженность поля поверхностной волны, распространяющейся вдоль одиночного провода, не превышает нескольких длин волн.

В оптическом диапазоне частот поверхностные волны Зоммерфельда математически описываются, в сущности, так же, как в радио- и СВЧ диапазонах (см. [20, § 62; 21, п. 4]), но согласно принятой терминологии, обычно называются поверхностными плазмон-поляритонами – сильно выраженной «самосогласованной комбинацией электромагнитной волны и перемещающихся зарядов» [21] или, что то же самое, «комбинированным возбуждением, состоящим из плазмона и фотона» [22]. Затухание и замедление волн Зоммерфельда

в этом диапазоне существенно выше, чем в диапазоне СВЧ [22]. Поскольку продольное волновое число плазмон-поляритонов больше волнового числа фотона, световое излучение, падающее из свободного пространства на поверхность проводника, возбудить поверхностную волну не может. Для ее «захвата» применяются специальные устройства, в частности – призмы или дифракционные решетки [21 – 23].

При дальнейшем увеличении частоты плазмон-поляритоны вырождаются в колебания локализованных поверхностных плазмонов – электронной плазмы вблизи поверхности металла. Это случай *плазмоноподобного возбуждения*, когда поперечная и продольная компоненты электрического поля сопоставимы [22].

До появления факельного разряда эквивалентную схему рассматриваемой электродинамической цепи можно представить в виде последовательного соединения сопротивления излучения линии как антенны –  $R_{\Sigma л.}$ , активного сопротивления потерь –  $R_n$  и реактивного сопротивления линии –  $iX_{л.}$  (рис. 3, а – см. работу [24, § 1.3]).

Возникший факельный разряд является для линии поглощающей нагрузкой и можно записать:  $R_n \approx R_{ф.р.} \gg R_{\Sigma л.}$  (рис. 3, б). То есть в режиме разряда потери на излучение столь малы, что сопротивлением  $R_{\Sigma л.}$  можно пренебречь. Подчеркнем, что это не строгие, а качественные рассуждения; в действительности, некоторая СВЧ мощность линией все же излучается. Поэтому в определенных случаях сопротивление  $R_{\Sigma л.}$ , входящее во входное сопротивление линии, все-таки следует учитывать.

Горящий факел представляет собою ионизированный объем газа, обладающий некоторой емкостью по отношению к земле. Обозначим эту емкость, как  $C_{ф.р.-з.}$  (рис. 3, в). Можно сказать, разряд замыкается на землю емкостным током, необходимым для поддержания горения. Предположение об этом первый высказал М. С Нейман [25, 26]. Очевидно, ток смещения, протекающий между разрядом и землей, обуславливает излучение электромагнитной энергии. К сожалению, на фоне доминирующего излучения факела становится проблематичным экспериментально сопоставить значения мощностей, излучаемых линией и факельным разрядом по отдельности.

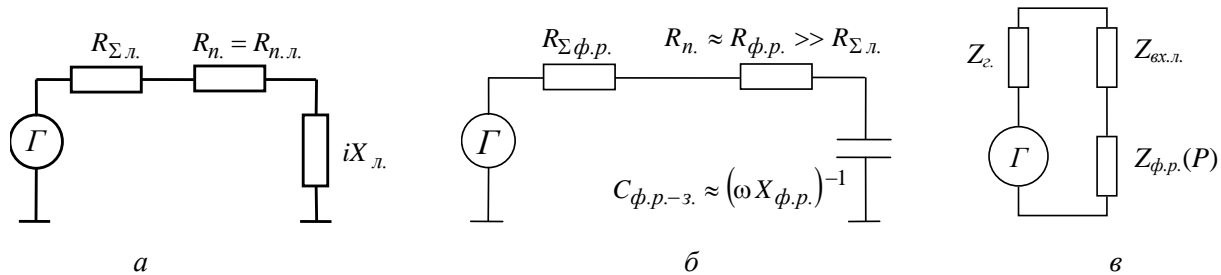


Рис. 3

В общем случае (после появления факельного разряда, с учетом внутреннего сопротивления генератора, излучения линией и разрядом) рассматриваемая электродинамическая цепь может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3, в. Здесь  $\Gamma$  – генератор (магнетрон);  $Z_г.$  – внутренний (выходной) импеданс генератора;  $Z_{вх.л.}$  – входной импеданс линии;  $Z_{ф.р.}(P)$  – импеданс факельного разряда; все эти три величины – комплексные:  $Z_{вх.л.} = R_{\Sigma л.} + R_{н.л.} + iX_{л.}$ ,  $Z_{ф.р.}(P) = R_{\Sigma ф.р.} + R_{н.ф.р.} + iX_{ф.р.}$ . (Суммарное сопротивление потерь  $R_n$  определяется потерями в линии и в факельном разряде:  $R_n = R_{н.л.} + R_{н.ф.р.}$ ).

Приведенная на рис. 3, в эквивалентная схема помогает дополнить проводимое нами качественное описание процессов в режиме факельного разряда.

Очевидно, для такой цепи можно рассматривать два способа согласования. Первый способ – согласование с однопроводной линией как антенной (если не пренебрегать излучением линии), а второй – согласование с факельным разрядом. В первом случае можно записать:  $Z_c + Z_{ф.р.}(P) \rightarrow Z_{вх.л.}$ , где  $P$  – потребляемая цепью мощность. Во втором случае:  $Z_c + Z_{вх.л.} \rightarrow Z_{ф.р.}(P)$ .

Обратим внимание на то, что в этих выражениях импеданс факельного разряда  $Z_{ф.р.}$  является функцией мощности возбуждения  $P$ , влияющей на концентрацию частиц в плазме разряда. Таким образом, от величины приложенной мощности зависит значение диэлектрической проницаемости разрядного канала и, следовательно, электрическая длина разряда как антенны и его входной импеданс. Изменение концентрации частиц факельного разряда, в свою очередь, оказывает влияние на значение КСВ в однопроводной линии. Справедливость рассматриваемой блок-схемы подтверждается экспериментом: в зависимости от мощности возбуждения изменяются ДН однопроводной линии и разряда как излучателей и мощность, расходуемая на излучение.

Итак, в режиме горения факельного разряда потери в однопроводной линии на излучение уменьшаются; большая часть подводимой СВЧ энергии передается по линии в разряд как в нагрузку посредством поверхностной волны [27]. Об этом также свидетельствует следующий, проведенный нами, эксперимент.

Однопроводная линия была окружена слоем воды объемом 0,5 л (см. рис. 4). Ее нагрев производился в течение одной минуты в двух случаях – во время горения факельного разряда и после его погашения. В обоих случаях к линии подводилось одинаковое значение СВЧ мощности. Было зарегистрировано, что во время горения факельного разряда температура указанного объема воды за одну минуту возрастает с 19,5° С до 20,5° С, а при отсутствии разряда (когда линия излучает преимущественно в поперечном направлении) – с 20,5° С до 23,5° С.

Поскольку линия может оказаться согласованной с плазмой не идеально, в общем случае волны в линии нельзя назвать чисто бегущими. Измерение распределения поля вдоль линии выполнялось нами путем перемещения вдоль провода приемной антенны-зонда с кристаллическим детектором и микроамперметром на выходе. Для наблюдения качественной картины распределения поля нами использовался индикатор в виде неоновой лампочки NH-3.

Мера отклонения от режима бегущей волны, как известно, определяется коэффициентом стоячей волны (КСВ):  $КСВ = E_{max}/E_{min}$ . Здесь  $E_{max}$  и  $E_{min}$  – соответственно, напряженности электрического поля в точках сечений с максимальной и минимальной интенсивностью. Ток детектора при слабых сигналах пропорционален квадрату напряженности электрического поля, или же интенсивности волны. Если  $a_{min}$  и  $a_{max}$  – показания токового прибора в точках максимума и минимума интенсивности, то КСВ определяется из выражения:  $\sqrt{a_{max}/a_{min}}$ .

В результате измерений было установлено, что в наихудшем случае КСВ не превышает двух-трех; однако в части экспериментов, проведенных нами для различных материалов линии и диаметров проводников, наблюдалась практически чисто бегущая волна.

К сожалению, нам не удалось достоверно определить показатели экспоненты поперечной компоненты электрического поля в линии. Причиной тому явились сильные помехи, обусловленные излучением факела. В будущем мы надеемся получить более качественные результаты за счет экранирования датчика и всей измерительной цепи [19].

### Практические приложения полученных результатов

Описанный СВЧ модуль может найти практическое применение наряду с широко известными плазмотронами, принцип работы которых основан на использовании явления

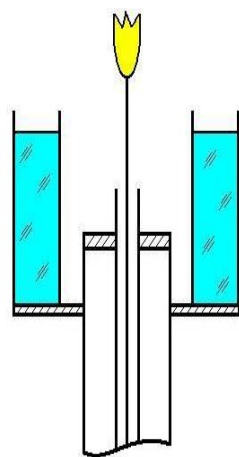


Рис. 4

СВЧ пробоя в коаксиальной линии в газовой среде. Высокотемпературный факельный разряд, возбужденный на конце однопроводной линии, может быть применен для экспериментов по поджигу плазмы, изучения свойств металлов, диэлектриков и полупроводниковых структур, напыления тонких пленок, утилизации отходов, в частности, для поджига водородного топлива в топочных устройствах котельных малой энергетики и т. д.

### Выводы

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет установить особенности распространения волны вдоль линии передачи в режиме разряда:

а) после возникновения факельного разряда потери в однопроводной линии на излучение снижаются и большая часть энергии передается в разряд как в нагрузку посредством поверхностной электромагнитной волны. Вследствие этого на конце линии создается высокая напряженность электромагнитного поля и происходит пробой с образованием факельного разряда;

б) в процессе переноса энергии от источника возбуждения к нагрузке (факельному разряду) поверхность проводника накаляется до высокой температуры и от этого покрывается окалиной. Это осложняет повторное возбуждение разряда (возможно, сложности эти подобны тем, которые связаны с «захватом» плазмон-поляритона в оптическом диапазоне [21 – 23]). Разогрев поверхности проводника, приводит к его испарению и появлению на границе раздела «металл-воздух» термоэлектронов [28, 29];

в) при напылении оксидно-металлической пленки на заземленную металлическую подложку расход материала, а также яркостная температура распыления и горения (окисления) проводника однопроводной линии определяются его свойствами и мощностью накачки.

*Авторы выражают благодарность проф. А. А. Булгакову за интерес к работе и плодотворные обсуждения полученных результатов.*

**Список литературы:** 1. *Sommerfeld A.* Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie // Ann. D. Phys. 1909. № 28. P. 665-736. 2. *Zennek J.* Breeding of even electromagnetic waves along an even conducting surface and its relation to radiotelegraphy // Ann. D. Phys. 1907. № 23. P. 846-866. 3. *Deibel J.A., Berndsen N., Wang K., Mittleman D.M.* Frequency dependent radiation patterns emitted by THz plasmons on finite length cylindrical metal wires // Optics exp. 2006. V. 14, № 19. P. 72-87. 4. *Mater S., Andrews S., Moreno M.* Terahertz Surface Plasmon-Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires // Phys. Rev. Let. 2006. № 97. P. 176-185. 5. *Зуев В.С.* Поверхностные поляритоны и плазмоны: спонтанное излучение атома вблизи тела малого размера. М.: РАН, ФИАН. Препринт № 3. 2006. 15 с. 6. *Логачева Е.И., Макин В.С., Конс П.* Роль поверхностных плазмон-поляритонов в поглощении излучения тонкими металлическими проволочками // Конф. «Прикладная оптика». Тез. докл. СПб, 2006. С. 191-195. 7. *Goubau G.* Surface waves and their application to transmission lines // J. Appl. Phys. – 1950. – № 21. – P. 1119-1128. 8. *Байбаков В.И., Дацко В.Н., Кистович Ю.В.* Экспериментальное обнаружение поверхностных электромагнитных волн Ценнека // Успехи физ. наук. – 1989. – № 4. – С. 722-724. 9. *Efimov B. P., Kuleshov A. N., Khorunzhii M. O., Mos'pan L. P.* The Properties of Microwave Discharge in the Goubau Line // High Temperature Apparatuses and Structures. 2008. V. 46, № 6. P.874-880. 10. *Puzanov A.O., Khorunzhiy M.O., Kuleshov A.N. and Yefimov B.P.* Research Results and Applications of Torch Discharge in the Goubau Line // IEEE Trans. on Plasma Science. 2011. V. 39, Issue 11, Part 1. P. 2878-2879. 11. *Петер Г.* Электронные лавины и пробой в газах. – М.: Мир, 1968. – 390 с. 12. *Браун С.* Элементарные процессы в плазме газового разряда. – М.: Гос. изд-во литературы в области атомной техники, 1961. – 324 с. 13. *Мак-Дональд А.* Сверхвысокочастотный пробой в газах. – М.: Мир, 1969. – 212 с. 14. *Кириченко А.Я., Мартынюк С.П., Моторненко А.П., Скуратовский И.Г., Суворова О.А.* Инициированный сферический СВЧ разряд при атмосферном давлении // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, № 15. – С. 55-60. 15. *Бардош Л., Лебедев Ю.А.* Электронный шаровой СВЧ разряд. Феноменология и результаты зондовых измерений // ЖТФ. – 1998. – Т. 68, № 12. – С. 29-33. 16. *Мосьпан Л.П.* П-образная диафрагма в прямоугольном волноводе // Сб. науч. трудов ИРЭ НАН Украины. – 1996. – Т. 1. – С. 34-40. 17. *Технология тонких пленок.* – М.: Сов. радио, 1977. – 662 с. 18. *Гершин Г.М.* Радиоизмерения. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 358 с. 19. *Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Жур-*



бенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны. – М. : Радио и связь, 1985. – 536 с. 20. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. – М. : Сов. радио, 1957. – 584 с. 21. Князев Б.А., Кузьмин А.В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестник Новосибирского государственного университета. Физика. – 2007. – Т. 2, вып. 1. – С. 108-122. [http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/01/Vestnik\\_NSU\\_07T2V1\\_p108\\_p122.pdf](http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/01/Vestnik_NSU_07T2V1_p108_p122.pdf). 22. Zayats A.V. and Smolyaninov I.I. Near-Field Photonics: Surface Plasmon Polaritons and Localized Surface Plasmons // Journal of Optics A Pure and Applied Optics. – 2003. – V. 5, № 4. – S16-S50. 23. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Механизмы поглощения и диссипации энергии в веществе. СПб : СПб ГУ ИТМО, 2005. 84 с. 24. Никольский В.В. Антенны. – М. : Связь, 1966. – 368 с. 25. Нейман М.С. // Известия электропромышленности слабого тока. – 1935. – № 7. – С. 38-48. 26. Кацов Н.А. Электроника. – М. : Гос. изд-во техн.-теоретич. лит-ры, 1956. – 460 с. 27. Шимони К. Электротехника. М.: Мир, 1964. 776 с. 28. Физический энциклопедический словарь. – М. : Сов. энциклопедия, 1984. – 994 с. 29. Физическая энциклопедия. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. – 995 с.

*Институт радиофизики и электроники  
им. А.Я. Усикова НАН Украины*

*Поступила в редколлегию 08.01.2013*