

ВОЗБУЖДЕНИЕ ФАКЕЛЬНОГО СВЧ-РАЗРЯДА В ОДНОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, М. О. Хорунжий, А. О. Пузанов

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: yefimov@ire.kharkov.ua

Приводятся результаты экспериментальных исследований поверхностных волн в однопроводной линии Губо, инициирующих на ее конце факельный СВЧ-разряд эрозионного типа. Рассмотрены два характерных режима работы линии: как штыревой антенны и как линии, передающей СВЧ-энергию в нагрузку (СВЧ-плазмод) посредством поверхностных плазмон-поляритонов. Описаны конструктивные особенности СВЧ-модуля, а также дополнительных элементов в его внешней цепи, предназначенных для измерения проходящей мощности: ответвителя, аттенюатора и т. п. Обсуждаются перспективы использования линии Губо для передачи СВЧ-энергии в широком диапазоне частот, а также для ряда практических приложений, в том числе для исследования физических свойств новых материалов и полупроводниковых устройств. Ил. 6. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: линия Губо, плазмон-поляритоны, поверхностная волна, эрозионный СВЧ-разряд, «факельный» разряд, волноводный СВЧ-модуль.

Возможность существования режимов поверхностных волн в линиях передачи показана в ряде теоретических работ, опубликованных в начале прошлого века. В то время решались задачи распространения локализованных радиоволн вдоль поверхности диэлектрической среды в случаях экспоненциального убывания амплитуд с расстоянием от поверхности как вглубь диэлектрика, так и в сторону граничащего с нею вакуума (поверхностные плазмон-поляритоны – ППП). Было установлено, что на границе двух изотропных сред ППП могут существовать при условии, если хотя бы одна из смежных сред обладает отрицательной диэлектрической или магнитной проницаемостью. Наибольший вклад в решение этих задач внес Арнольд Зоммерфельд [1] и Дж. Ценнек [2]. Поверхностные электромагнитные волны на границе металла впервые обнаружены Робертом Вудом. Это так называемые решетчатые аномалии или аномалии Вуда. Их интерпретация как поверхностных плазмон-поляритонов дана в 1941 г. У. Фано [3].

В последние годы возрос интерес к освоению терагерцевой (ТГц) диапазона частот – одного из интенсивно развивающихся направлений современной прикладной радиофизики [4–7]. Однако в большинстве исследований при разработке теоретических моделей и при постановке экспериментов в основном используют результаты, относящиеся к световому и инфракрасному диапазонам частот, тогда как к результатам на длинноволновых участках спектра, в частности, сантиметровому (см) диапазону длин волн, уделяется недостаточно внимания. Исследования характеристик распространения поверхностных волн в этом диапазоне частот расширяют физические представления об особенностях передачи СВЧ-энергии в линиях передачи и позволяют найти для обнаруженных явлений новые технические приложения.

Этим вопросам уделено большое внимание в работе [8], в которой показано:

- в однопроводной линии, возбуждаемой источником СВЧ-волн, может распространяться волна типа ППП;
- описаны особенности их распространения и рассмотрен ряд технических приложений;
- проанализированы режимы, при которых в линии происходит СВЧ-пробой и возникает эрозионный факельный СВЧ-разряд.

Рассуждая о практических приложениях, прежде всего отметим, что эрозионный разряд может быть использован для напыления тугоплавких материалов на подложки с хорошей адгезией. Дальнейшее углубленное исследование свойств поверхностных волн в однопроводной линии открывает широкие перспективы для построения СВЧ-устройств, в основе работы которых лежат новые физические закономерности.

Данная работа является логическим продолжением экспериментальных исследований свойств поверхностных волн в СВЧ-диапазоне. Для целей проведения экспериментальных исследований нами разработано генераторное устройство – волноводный СВЧ-модуль с рабочей длиной волны 12 см. С его помощью производилось возбуждение отрезка однопроводной линии, расположенной вертикально. Далее рассматриваются два случая: первый – когда однопроводная линия работает как штыревая антенна (назовем этот режим докритическим – по уровню подводимой СВЧ-мощности), второй – СВЧ-мощность превышает пробойное пороговое значение и, как следствие, возникает режим поверхностных волн с образованием на конце однопроводной линии факельного СВЧ-разряда.

1. Вертикальный отрезок однопроводной линии в режиме излучения. До возникновения «факельного» разряда (в докритическом режиме) однопроводную линию можно рассмат-

ривать как штыревую антенну (несимметричный вибратор Герца) [9]. В ней, по сравнению с симметричным вибратором, сопротивление излучения и входное сопротивление в два раза меньше, поскольку при одинаковых токах первый излучает в два раза меньшую мощность (излучение в нижнее полупространство отсутствует) [10]. Коэффициент направленного действия в два раза больше, так как при одинаковой мощности излучения первый обеспечивает в два раза большую угловую плотность мощности: вся мощность излучается лишь в одно полупространство. Сказанное справедливо для идеального несимметричного вибратора, т. е. для случая, когда земля представляет собою идеальный проводник. Однако поскольку почва является диэлектриком с потерями (ее диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4,5 \div 21,5$ и удельная проводимость $\sigma = 2 \cdot 10^{-3} \div 7,7 \cdot 10^{-2}$ См/м), происходит изменение электрической длины мнимого диполя и длины пути токов смещения. Вследствие этого происходит искажение диаграммы направленности (ее лепестки приподнимаются вверх и пропадает излучение под малыми углами к горизонту), а также возрастает входное сопротивление излучающего штыря.

Большое значение приобретают пространственное расположение штыревой антенны и условия ее согласования с источником возбуждения – СВЧ-генератором. При расчетах обычно ориентируются на четвертьволновую электрическую длину антенны. Ее удлинение или укорочение компенсируют согласующими элементами (катушками индуктивности или конденсаторами). Если вдоль проводника антенны (на его геометрической длине) укладывается несколько четвертей длины волны, диаграмма направленности (ДН) имеет многолепестковую форму. Вид ДН также зависит от высоты расположения антенны по отношению к поверхности земли.

В нашем случае штыревая антенна одним концом соединена с широкой стенкой волновода и возбуждается электрической компонентой электромагнитного поля. Согласование антенны с волноводом осуществляется через отрезок коаксиальной линии, проходящей через окно связи. В эксперименте по измерению ДН антенны были использованы штыри размером в одну, две и три длины волны. Измеренные ДН в E - и H -плоскостях при длине антенны в одну длину волны представлены на рис. 1. Они измерялись в дальней зоне в случае, когда расстояние от точки наблюдения намного превосходило длину волны λ и размеры вибратора:

$$r \gg 2l, \quad r \gg \lambda,$$

где r – расстояние от вибратора до детектора приемной антенны; l – длина вибратора.

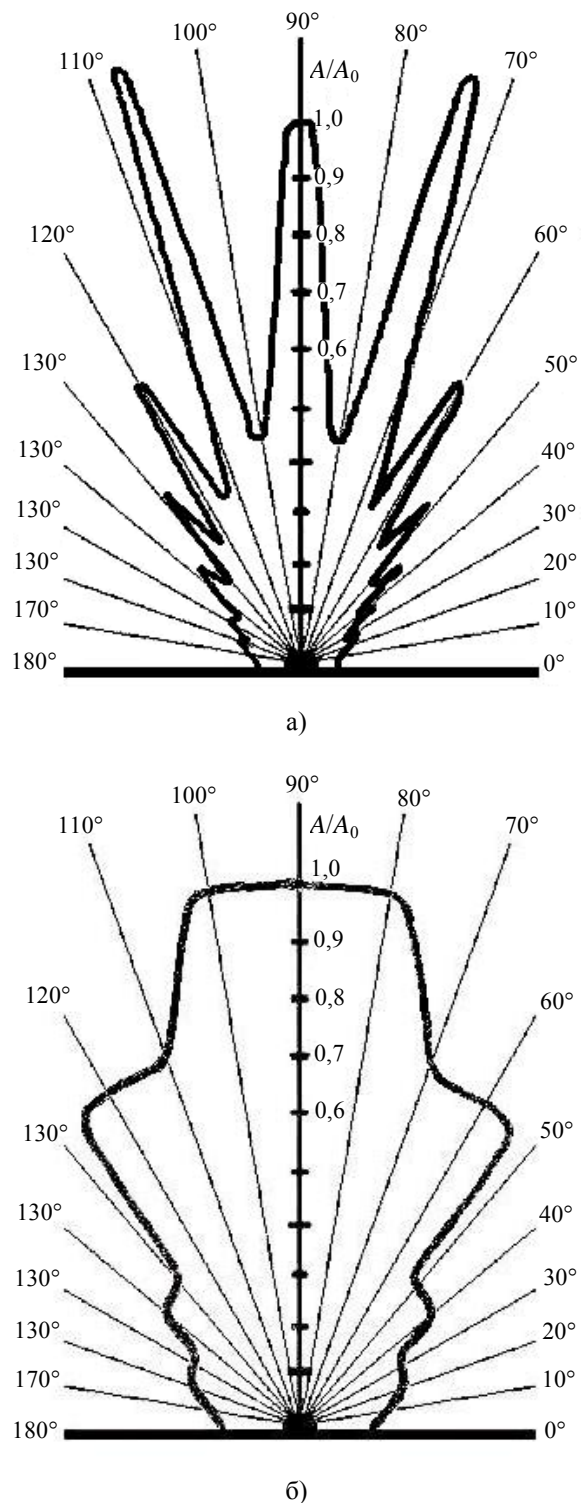


Рис. 1. Диаграмма направленности излучения штыревой антенны в E - (а) и H -плоскостях (б)

Отметим, что наличие максимума ДН в направлении оси проводника антенны обусловлено влиянием неэкранированной поверхности волновода, подводящего СВЧ-мощность; поверхность волновода излучает за счет наведенных токов проводимости.

2. Вертикальный отрезок однопроводной линии: режим поверхностной волны. В предыдущем разделе вертикальный отрезок однопроводной линии играл роль штыревой антенны. Этот случай справедлив, когда подводимой от магнетрона СВЧ-мощности недостаточно для самопроизвольного СВЧ-пробоя на конце линии. Но однопроводная линия может работать и в другом режиме – режиме бегущей поверхностной волны в форме ППП. Этот режим работы возникает в случае, когда передаваемая в линию СВЧ-мощность превышает пробойное (начальное) значение. Тогда на конце проводника линии возникает факельный СВЧ-разряд.

Итак, для возбуждения на конце однопроводной линии СВЧ-разряда необходимо подвести к ней значительный уровень СВЧ-мощности. Этого можно добиться:

- изменяя режим работы магнетрона (например, при его работе в одно- или двухполупериодном режимах);
- изменяя размер окна связи с нагрузкой;
- управляя фазой стоячей волны в волноводе с помощью короткозамыкающего поршня;
- изменяя диаметр провода однопроводной линии.

Расчет пробойного напряжения в линии для поверхностной волны довольно сложен. Однако известны простые соотношения для максимальных значений тока и напряжения *ТЕМ*-волны в фидерной линии передачи. Так, эффективные значения напряжения в пучности напряжения и тока в пучности тока определяются из следующих выражений соответственно [11]:

$$U_{\text{пучн}} = \sqrt{P R_{\text{пучн}}^{\text{H}}};$$

$$I_{\text{пучн}} = \sqrt{P / R_{\text{пучн}}^{\text{T}}},$$

где P – мощность, подводимая к линии; $R_{\text{пучн}}^{\text{H}} = W/K$ – сопротивление линии в пучности напряжения; $R_{\text{пучн}}^{\text{T}} = WK$ – сопротивление линии в пучности тока; W – волновое сопротивление линии; K – коэффициент бегущей волны в линии.

Напряженность электрического поля E максимальна у поверхности проводника и может быть выражена через напряженность магнитного поля H следующим образом: $E = 120\pi H$. Если проводник имеет радиус d и по нему протекает ток I , то значение напряженности магнитного поля у поверхности проводника будет иметь значение $H = I/(\pi d)$. При наличии отраженной волны и фиксированной передаваемой мощности напряженность поля в пучности возрастает в $1/\sqrt{K}$ раз. Следовательно,

$$E_{\text{max}} = 120 \frac{\sqrt{P}}{d \sqrt{R_{\text{пучн}}^{\text{T}}}}.$$

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 ≈ 30 кВ/м), воздух начинает ионизироваться и происходит его электрический пробой. Заметим также, что пробойная напряженность поля зависит от частоты. Допустимой для линии передачи принята амплитудная напряженность поля $E_a = 6-7$ кВ/см.

Суть явления пробоя состоит в следующем. Вблизи поверхности проводников находятся свободные электроны. Под влиянием поля проводника их скорость увеличивается. 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.

Ионизацию также сопровождает процесс рекомбинации и отчасти рассеяние свободных заряженных частиц в пространство. 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 – ионизированный объем воздуха начинает светиться.

3. Структура и распространение ППП в однопроводной линии в режиме СВЧ-разряда. В настоящее время уделяется большое внимание изучению свойств поверхностных электромагнитных волн. Поскольку в их возбуждении принимают участие свободные носители заряда в металле, эти волны часто называют поверхностными плазмон-поляритонами [3–8]. ППП являются частично продольными электромагнитными волнами *ТМ*-типа: магнитный вектор H , перпендикулярный направлению распространения ППП, лежит в плоскости поверхности; электрический вектор имеет две составляющие: E_x – вдоль волнового вектора k_s , E_z – перпендикулярно поверхности (рис. 2). ППП можно описать уравнениями Максвелла, дополненными стандартными граничными условиями.

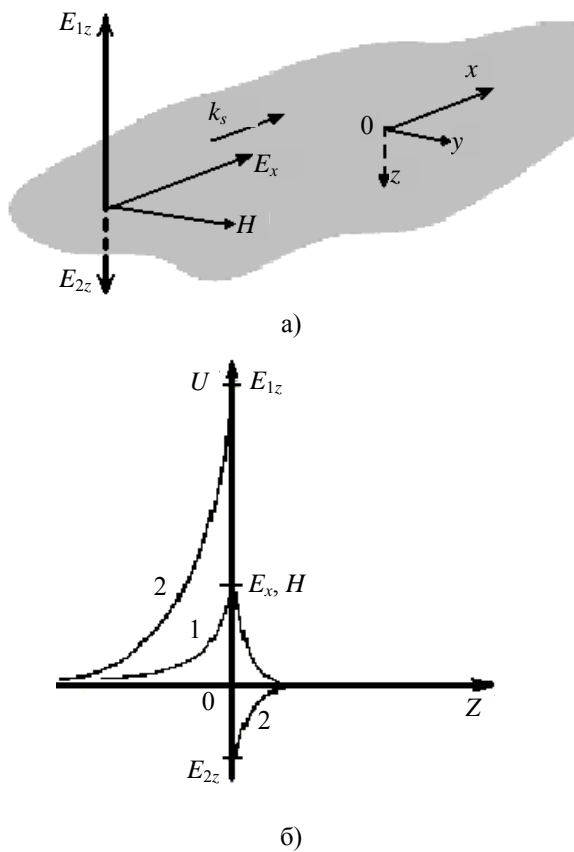


Рис. 2. Поверхностные поляритоны: а) – ориентация электрического и магнитного векторов поверхностной волны; б) – распределение полей поверхностной волны в плоскости (1 – для компонент E_x и $H_{//}=H$, изменяющихся при $z=0$ непрерывно; 2 – для компоненты E_z , испытывающей скачок при $z=0$)

В коротковолновых диапазонах длин волн, в частности, в световом диапазоне ППП, экспоненциально локализованные у поверхности металла и обладающие высокой чувствительностью к поверхностным неоднородностям, являются уникальным инструментом изучения в микроскопии ближнего поля. Действительно, если при распространении вдоль плоской поверхности ППП встречает локальную неоднородность в виде наноскопического объекта (например, поверхностный дефект, естественная наноструктура, шероховатости и пр.), то ППП рассеивается. Тогда по картине распределения результирующего электромагнитного поля можно судить о свойствах рассеивателя. В см диапазоне практически отсутствуют сведения о характере поведения ППП в однопроводной линии. В связи с этим представляет интерес установление картины распределения поля в однопроводной линии экспериментально – в режиме, когда конец ее работает на нагрузку, представляющую собой плазменный объем, т. е. эрозионный СВЧ-разряд в воздухе.

Распространяющаяся вдоль одиночного проводника поверхностная волна практически

«течет» по трубке некоторого радиуса r_0 (r_0 – отсчитывается от оси проводника), 75 % ее энергии сосредоточено вокруг проводника, в пределах расстояний около $\lambda/2$ от него. При этом амплитуда E_z -компоненты спадает по экспоненте при удалении от оси проводника. Поскольку линия согласована с плазмидом не идеально, волны в линии нельзя назвать чисто бегущими. Из-за существенных отличий однопроводной линии от двухпроводной, коаксиальной и тем более волноводной измерение характера поля вдоль линии выполнено нами двумя способами.

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. Измерение КСВ осуществлялось путем перемещения кристаллического детектора вдоль проводника линии, параллельно ему. Ток детектора при слабых сигналах пропорционален квадрату напряженности электрического поля, или же интенсивности волны. Обозначив через a_{min} и a_{max} показания токового прибора в точках максимума и минимума интенсивности, для КСВ получим:

$$КСВ = \sqrt{a_{max}/a_{min}}$$

Известно, что наибольшая интенсивность стоячей волны в линии наблюдается в том случае, когда длина проводника (вертикального отрезка однопроводной линии) равна нечетному числу четвертей длины волны. Измерение амплитуды напряженности поля вдоль линии производилось с использованием индикатора, представляющего собой полуволновую антенну. Индикатор помещался вдоль линии и на небольшом расстоянии от нее. Антенна включена в цепь СВЧ-диода и микроамперметра. В такой цепи высокочастотное поле индуцирует ток, пропорциональный амплитуде напряженности поля СВЧ. В результате измерений установлено, что $КСВ \approx 3$, и следовательно, волна весьма существенно отражается от СВЧ-плазоида.

Для подтверждения полученных количественных данных был применен также другой метод измерения, основанный на использовании в качестве индикатора излучения радиометра, в котором датчиком выступает активный элемент с S-образной вольтамперной характеристикой. Таким элементом является неоновая лампочка НН-3. Ее чувствительность к СВЧ-излучению максимальна вблизи газового разряда. Яркость свечения неоновой лампочки свидетельствует об уровне напряженности поля в данной точке пространства.

Чувствительность индикатора регулировалась при помощи встроенных в устройство по-

тенциометра и конденсатора. Измерения вторым методом дали аналогичные результаты.

Отметим, что в процессе регистрации топографии СВЧ-полей не удалось достоверно определить показатель экспоненты компоненты поля линии E_z . Это связано с неблагоприятной помеховой обстановкой в месте проведения измерений. Помехи прежде всего были обусловлены излучением магнетрона и СВЧ-плазоида. Результаты могут быть улучшены за счет более качественного экранирования активного датчика, а также всей измерительной цепи [12].

В рассматриваемом режиме электродинамическая цепь, включающая в себя магнетрон, однопроводную линию и «факельный» разряд, может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3. Здесь M – генератор (магнетрон); Z_M – внутренний (выходной) импеданс генератора; $Z_{вх}(P)$ – входной импеданс антенны; $Z_{ф.р.}(P)$ – импеданс «факельного» разряда (все эти три величины – комплексные).

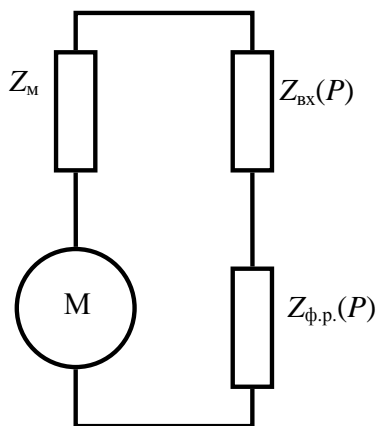


Рис. 3. Эквивалентная схема электродинамической цепи в режиме факельного разряда

Приведенная эквивалентная схема помогает на качественном уровне описать процессы, происходящие в режиме СВЧ-разряда. Очевидно, для такой цепи можно рассматривать два способа согласования. Первый способ – согласование с однопроводной линией как антенной, а второй – согласование с «факельным» разрядом. В первом случае можно записать

$$Z_M + Z_{ф.р.}(P) = Z_{вх}(P),$$

где P – потребляемая цепью мощность. Во втором случае

$$Z_M + Z_{вх}(P) = Z_{ф.р.}(P).$$

Обратим внимание на то, что в этих выражениях импеданс факельного разряда $Z_{ф.р.}$ и входной импеданс антенны $Z_{вх}$ являются функцией мощности возбуждения P . Действительно, потребляемая цепью мощность, распределяясь меж-

ду ее элементами, влияет на степень ионизации поверхностного слоя проводника антенны, а также на концентрацию частиц светящегося «факельного» разряда. Концентрация частиц поверхностного слоя проводника однопроводной линии, очевидно, влияет на значение диэлектрической проницаемости поверхностного слоя и, следовательно, изменяет электрическую длину антенны и ее входной импеданс. Изменение концентрации частиц «факельного» разряда, в свою очередь, оказывает влияние на значение КСВ. Справедливость рассматриваемой блок-схемы подтверждается экспериментом: в зависимости от мощности возбуждения изменяется ДН однопроводной линии как излучателя и изменяется мощность, расходуемая на излучение.

4. СВЧ-элементы на основе однопроводной линии. Распределение амплитуды поверхностной волны в однопроводной линии и измеренное значение КСВ (которое зависит от нагрузки в виде факельного СВЧ-разряда на конце линии) позволяют определить СВЧ-мощность, потребляемую всей системой.

Для типовых линий передачи (волноводы, коаксиальные линии, квазиоптические и др.) методы измерения СВЧ-мощности в см и мм диапазонах волн хорошо известны. Наиболее распространены методы вольтметра, термистора, калориметрический, а также метод фотометра [13]. Каждый из них имеет как свои преимущества, так и ограничения по таким параметрам, как погрешность, частотный диапазон, предельные значения измеряемых мощностей, область применения.

С учетом специфики конструкции однопроводной линии важно правильно выбрать метод измерения проходящей в нагрузку СВЧ-мощности. Однако конструкции измерителей мощности, применяемые в типовых линиях передачи, в нашем случае оказываются непригодными. Решение было найдено опытным путем: поскольку в нашем случае уровни СВЧ-мощности весьма велики и достигают сотен ватт, из всех перечисленных выше методов измерений наиболее подходящим и доступным оказался калориметрический метод. В качестве нагрузки в нем используется вода. Известно, что вода обладает электрическим дипольным моментом и хорошо поглощает СВЧ-энергию в см диапазоне волн. Поэтому была предложена, на наш взгляд, удачная конструкция измерителя проходящей СВЧ-мощности, схема которой изображена на рис. 4, а: 1 – поршень; 2 – резонатор на отрезке волновода с типом колебаний H_{10} ; 3 – внутренний проводник; 4 – изолятор; 5 – кварцевая трубка; 6 – однопроводная линия; 7 – многослойная конструкция СВЧ-устройства; 8 – факел. Через камеру и уплотнение пропущена вольфрамовая проволока 6 диаметром 0,4 мм. Поршень 1 служит для настройки волноводного резонатора на режим максимальной мощности.

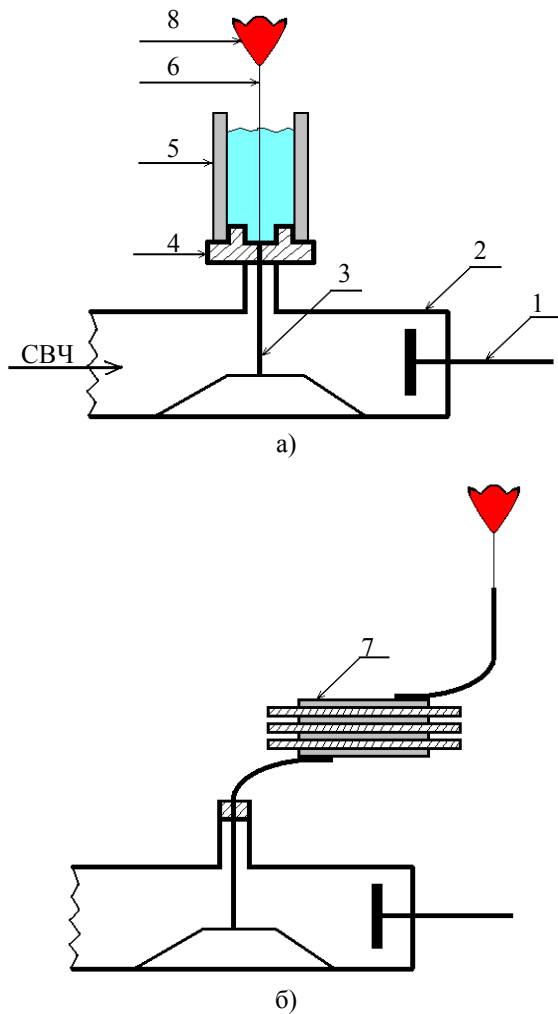


Рис. 4. Схема части СВЧ-модуля, работающего в режимах измерителя мощности (а) и волноводного устройства (б)

Поступающая в нагрузку СВЧ-мощность вычисляется по формуле $Q = cm\Delta t$. Здесь c – удельная теплоемкость, $\text{кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$; m – масса воды, г; Δt – разность между конечной и начальной температурой, град. В режиме возбуждения на конце линии СВЧ-разряда отрезок вольфрамового провода длиной 3 см нагревал 5 г воды до температуры $100\text{ }^\circ\text{C}$. Начальная температура воды составляла $15\text{ }^\circ\text{C}$. При этом выделяется 425 кал тепла. С учетом термического эквивалента теплоты $B = 0,24\text{ кал/Дж}$ получаем количество энергии 1780 Дж. Эта энергия выделяется отрезком вольфрамовой проволоки в течение 26 с, что соответствует мощности 68 Вт. Таким образом, при известной полной длине однопроводной линии можно легко определить полную мощность, потребляемую плазменным образованием.

Для обычных линий передачи – волноводов, полосков, коаксиалов и пр. – имеется набор стандартных элементов и узлов: ответвителей, аттенуаторов, фазовращателей и т. д. Подобные элементы отсутствуют в случае передачи СВЧ-

энергии поверхностной волны по однопроводной линии. В настоящее время механизм трансформации и распространения энергии по однопроводной линии исследован недостаточно, в этой области открываются широкие экспериментальные и теоретические поля деятельности.

На рис. 4, б показано устройство для передачи СВЧ-энергии поверхностной волны в нагрузку через электродинамически сложный СВЧ-элемент 7. Это многослойная металлодиэлектрическая структура из медных пластин толщиной 0,2 мм и слюдяных пластин (мусковит шаблонка) толщиной 0,006 мм. Эксперименты показали, что такая структура может выполнять роль ответвителя, аттенуатора, фазовращателя и т. п. Выходные характеристики этого устройства во многом определяются геометрическими размерами и толщиной металлических пластин, а также диэлектрическими свойствами материала слюды.

В экспериментах с описываемым устройством нами использовались различные материалы: Cu, Ni, Ag, Al, Al_2O_3 (сапфир), ситал, поликор, алунд, керамика. Результаты исследований оказались перспективными: были достигнуты малые потери, широкополосность, электрическая прочность и надежность конструкции. Данная разновидность СВЧ-устройства может рассматриваться как основа для разработки новых конструкций для исследования СВЧ-методами параметров полупроводников, полосковых линий, а также одно- и многослойных пленок.

На рис. 5 приведена фотография СВЧ-модуля, который на практике демонстрирует передачу высокочастотной энергии посредством поверхностной волны в нагрузку (плазмод) через СВЧ-элемент 7, который был описан выше.

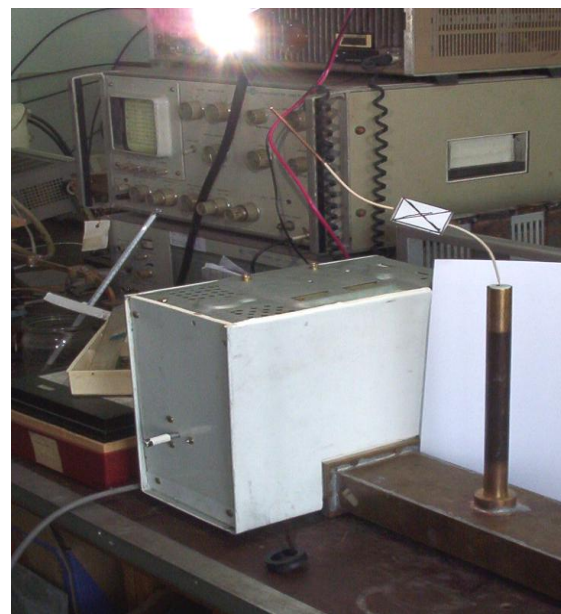


Рис. 5. Эрозионный СВЧ-разряд в линии Губо при испытании многослойной металлодиэлектрической структуры

На фото видна коаксиальная линия, исследуемый элемент 7 в разрыве однопроводной линии, плазменный эрозионный СВЧ-разряд, блоки питания и управления модулем.

Выводы. Рассмотренный СВЧ-модуль может иметь большое практическое значение наряду с широко применяемыми плазмотронами, которые основаны на использовании явления СВЧ-пробоя в коаксиальной линии в среде различных газов. Преимущества данного устройства заключаются в высокой температуре СВЧ-разряда (порядка 5 000 °С), в наличии однопроводной линии, с помощью которой источник высокой температуры можно с малыми потерями доставлять в любую заданную точку пространства. Отсутствие сопла в коаксиале существенно повышает надежность конструкции, а процессы эрозии металлического проводника могут быть применены в качестве нового метода напыления с хорошей адгезией тугоплавких металлов на подложки. Преимущество рассмотренного метода создания тонких пленок состоит в чистоте напыленного материала, поскольку процесс испарения совершается в отсутствие каких-либо подложек. Возможно также применение однопроводной линии и высокотемпературного факельного СВЧ-разряда в нефтяной промышленности, например, при утилизации газа, сопутствующего добыче нефти. На фотографии рис. 6 показан процесс сжигания бытового газа (пропана), пропускаемого через трубку внутреннего проводника коаксиала в направлении факельного СВЧ-разряда.



Рис. 6. Момент утилизации бытового газа (пропан)

Соавторы выражают искреннюю благодарность проф. А. А. Булгакову за полезные советы и критические замечания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке международного фонда УНТЦ, грант № 3979.

1. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie // Ann. D. Phys. – 1909. – No. 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. – No. 23. – P. 846–866.
3. Валенский С. И. Микроскоп на поверхностных плазмонах // Соросовский образовательный журнал. Физика. – 1999. – № 8. – С. 76–82.
4. Jason A. Deibel, Nicholas Berndsen, Kanglin Wang, Daniel M. Mittleman. Frequency dependent radiation patterns emitted by THz plasmons on finite length cylindrical metal wires // Optics exp. – 2006. – 14, No. 19. – P. 72–87.
5. Stefan A. Mater, Steve R. Andrews, Martin Moreno L. Terahertz Surface Plasmon-Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires // Phys. Rev. Let. – 2006. – No. 97. – P. 176–185.
6. Зуев В. С. Поверхностные поляритоны и плазмоны: спонтанное излучение атома вблизи тела малого размера. – М.: Препринт-3 ФИАН, 2006. – 15 с.
7. Логачева Е. И., Макин В. С., Конс П. Роль поверхностных плазмон-поляритонов в поглощении излучения тонкими металлическими проволочками // Тр. конф. «Прикладная оптика – 2006». – Санкт-Петербург, 2006. – С. 191–195.
8. Efimov B. P., Kuleshov A. N., Khorunzhiy M. O., Mos'pan L. P. The Properties of Microwave Discharge in the Goubau Line // High Temperature Apparatuses and Structures. – 2008. – 46, No. 6. – P. 874–880.
9. Goubau G. Surface waves and their application to transmission lines // J. Appl. Phys. – 1950. – No. 21. – P. 1119–1128.
10. Справочник по радиолокации. В 4-х т. / Пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова. – М.: Сов. Радио, 1978. – Т. 4. – 376 с.
11. Гершин Г. М. Радиоизмерения. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 358 с.
12. Айзенберг Г. З., Белоусов С. П., Журбенко Э. М. и др. Коротковолновые антенны. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.
13. Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот: учеб. пособ. В 2-х т. Т. 2. Электровакуумные приборы сверхвысоких частот / Под ред. Н. Д. Девяткова. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 616 с.

EXCITATION OF MW TORCH DISCHARGE AT THE EDGE OF SINGLE-CONDUCTOR LINE

B. P. Yefimov, A. N. Kuleshov, M. O. Khorunzhiy,
A. O. Puzanov

Experimental results of surface waves propagating along single-conductor Goubau line and exciting torch MW-discharge of erosion type have been presented. Two characteristic regimes of the line are described: the case when it works like spike antenna and the case when it transmits MW-energy via surface plasmon-polariton to the load, which is MW-plasma. The description of MW set-up features and additional elements for transmitted energy measurements in set-up external circuit are given. The prospect of Goubau line application as transmitting line of MW energy in wide frequency range and also several possible practical applications of the line in new material processing and semiconductor devices development have been discussed.

Key words: Goubau line, plasmon-polariton, surface wave, erosion MW discharge, torch discharge, waveguide MW set-up.

ЗБУДЖЕННЯ ФАКЕЛЬНОГО НВЧ-РОЗРЯДУ
В **ОДНОДРОТОВІЙ** ЛІНІЇ

Б. П. Єфімов, О. М. Кулешов, М. О. Хорунжий,
О. О. Пузанов

Наведено результати експериментальних досліджень поверхневих хвиль в однодротовій лінії Губо, що ініціюють на її кінці факельний НВЧ-розряд ерозійного типу. Розглянуто два характерні режими роботи лінії: як штирєва антена та як лінія, що передає НВЧ-енергію в навантаження (НВЧ-плазмоїд) за допомогою поверхневих плазмон-

поляритонів. Описано конструктивні особливості НВЧ-модуля, а також додаткових елементів у його зовнішньому колі, що призначені для вимірів прохіджувальної потужності: відгалужувача, атенюатора та т. ін. Обговорюються перспективи використання лінії Губо для передачі НВЧ-енергії у широкому діапазоні частот, а також для ряду практичних застосувань, у тому числі для дослідження фізичних властивостей нових матеріалів і напівпровідникових пристроїв.

Ключові слова: лінія Губо, плазмон-поляритони, поверхнева хвиля, ерозійний НВЧ-розряд, «факельний» розряд, хвилеводний НВЧ-модуль.

Рукопись поступила 4 июня 2009 г.