

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, М. О. Хорунжий, Л. П. Мосьпан, Свойства СВЧ-разряда в линии Губо, *ТВТ*, 2008, том 46, выпуск 6, 944–950

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.80

15 марта 2025 г., 17:49:34



## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АППАРАТЫ И КОНСТРУКЦИИ

УДК 621.385.6

### СВОЙСТВА СВЧ-РАЗРЯДА В ЛИНИИ ГУБО

© 2008 г. Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, М. О. Хорунжий, Л. П. Мосьпан

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

Поступила в редакцию 05.07.2007 г.

В работе представлен волноводно-коаксиальный СВЧ-модуль, позволяющий возбуждать на конце однопроводной линии Губо факельный СВЧ-разряд в воздухе. Описаны его свойства и возможные способы применения для нанесения на подложки мелкоструктурных пленок из тугоплавких материалов. Экспериментально подтвержден поверхностный характер распространения СВЧ-энергии вдоль однопроводной линии в форме плазмон-поляритонов.

PACS: 52.80.Pi

#### ВВЕДЕНИЕ

Однопроводная открытая линия, известная как линия Губо [1], интенсивно изучается в качестве средства передачи электромагнитной энергии с малыми потерями в широком диапазоне частот от терагерц до мегагерц [2–6].

Передача длинноволновых сигналов в такой линии предполагается посредством поверхностных волн, также известных как волны Зоммерфельда–Ценнека (Sommerfeld–Zenneck) [2, 4]. Потери в таких линиях передачи характеризуются потерями на излучение, электрическое сопротивление и в диэлектрических оболочках, если они покрывают металлические проводники. Условием существования в однопроводной линии режима поверхностной волны является комплексность диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ,  $\epsilon'' > 0$ . На границе раздела возникает волна Ценнека с фазовой скоростью  $v > c$  ( $c$  – скорость света) [4]. Кроме того, на неоднородностях волноведущего проводника может наблюдаться трансформация поверхностной волны в объемное излучение.

В коротковолновых диапазонах (световом, инфракрасном), если  $\epsilon < 0$ , в линии на границе раздела металл–воздух будут существовать так называемые волны Фано с фазовой скоростью  $v < c$ , наблюдающиеся, как правило, в газоразрядной плазме (поверхностные плазмоны), в полупроводниках и металлах. В настоящее время они активно исследуются и применяются в спектроскопии поверхности [4, 6].

Такую однопроводную линию удобно использовать в эксперименте как передающую линию для возбуждения СВЧ-разряда на ее конце.

Существует большое разнообразие способов возбуждения СВЧ-разрядов, например в волноводах под воздействием бегущей или стоячей электромагнитной волны, в вакуумных резонаторах или с газовым наполнением. Используются ди-

электрические линзовые концентраторы полей, внешние источники ионизирующего излучения, пучки свободных электронов для инициирования СВЧ-разряда [7–9].

При исследовании свойств разрядов в различных газовых средах при разных давлениях в замкнутых объемах типа волноводов и резонаторов возникает ряд сложностей в визуальном и дистанционном зондировании разрядного процесса. В данной работе рассматривается механизм возбуждения СВЧ-разряда вне замкнутого объема (в свободном пространстве) на конце однопроводной линии. Целью работы являются создание модуля (установки) для физической реализации рассматриваемого механизма, а также оптимизация некоторых узлов волноводной и коаксиальной линий устройства и создание условий для возбуждения СВЧ разрядного плазмоида на конце линии Губо.

В аналогичной постановке задачи в работе [10] рассматривался инициированный разряд на конце антенны (сходной с несимметричным четвертьволновым вибратором), расположенной в потоке аргона, вытекающего в свободное пространство из коаксиального трехсантиметрового СВЧ-плазмотрона. Был обнаружен факельный разряд, трактуемый как “огонь святого Эльма”. Такое свечение наблюдается в статических полях атмосферного электричества. Радиус сферы разряда соответствовал примерно толщине скин-слоя. Необходимо отметить, что внутренний проводник коаксиала (антенны) в эксперименте выступал наружу на четверть длины волны.

В работе [11] описан шаровой СВЧ-разряд, инициированный генератором на частоте 2.45 ГГц. Разряд возникает в конце антенны в металлической камере с размерами, существенно большими размеров светящейся области плазмы. Утверждается, что пространственная структура поля, распространяющаяся вдоль поверхности разряда, соответствует структуре поля поверхностной вол-

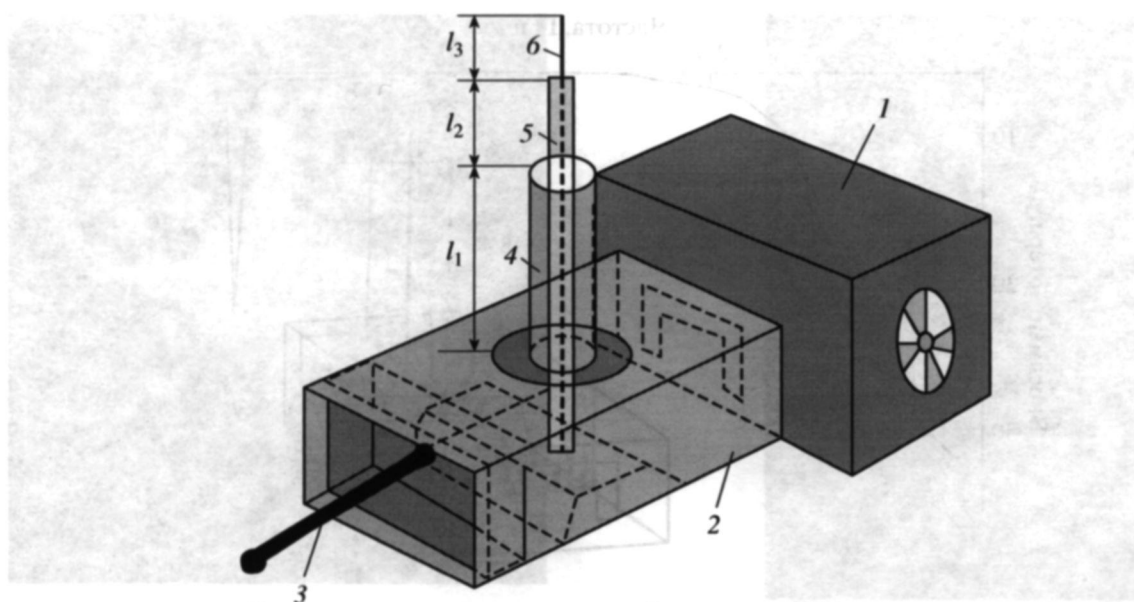


Рис. 1. СВЧ-модуль: 1 – магнетрон, 2 – резонатор на отрезке волновода с типом колебания  $H_{10}$ , 3 – поршень, 4 – коаксиальная линия длиной 13 см, 5 – проводник, 6 – линия Губо.

ны. Как следует из работы, характер разряда и его форма существенно зависят от параметров СВЧ возбуждаемого контура (камеры, линии передачи, подстроечных поршней и т.д.). Он представляет собой сильно связанную СВЧ-систему.

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ (СВЧ-МОДУЛЯ)

СВЧ-установка, представленная на рис. 1, состояла из генератора 1 (промышленный магнетрон М105 непрерывного действия) с выходной мощностью порядка 700 Вт на длине волны 12 см.

Через П-образную диафрагму (окно связи) возбуждался резонатор, представляющий собой отрезок прямоугольного волновода 2 сечением 90 мм на 45 мм, закороченного подвижным поршнем 3 с другой стороны волновода. Широкая нижняя стенка резонатора была изготовлена в виде усеченной пирамиды, которая плавно уменьшала сечение волновода вдоль его узкой стенки с 45 до 25 мм, что обеспечивало широкополосное согласование и снижение уровня вносимых потерь в полосе. С широкой стенкой прямоугольного резонатора соединялся отрезок коаксиальной линии 4 длиной  $l_1$ , внутренний проводник которой длиной  $l_2$  переходил в однопроводную линию Губо длиной  $l_3$ . С помощью согласующихся диафрагм и подвижного поршня, а также подбором  $l_1$  и  $l_2$  достигался режим максимальной передачи СВЧ-мощности от генератора в линию Губо. Ее длина составляла несколько длин волн и представляла собой вольфрамовую проволоку диаметром 0.4 мм.

В целом электродинамические характеристики устройства рассчитывались в терминах его обобщенной матрицы рассеяния по двухэтапной схеме. На первом этапе в соответствии с принципом декомпозиции устройство разбивалось на набор более простых неоднородностей, для каждой из которых решалась соответствующая задача рассеяния. По найденным матрицам рассеяния этих неоднородностей на втором этапе находилась матрица рассеяния всего устройства в целом. Расчетная характеристика волноводного узла представлена на рис. 2, там же на вставке схематично изображены распределения электрических полей в отдельных поперечных сечениях узла. Из рис. 2 видно, что в рабочем диапазоне частот магнетрона (2–3.5 ГГц) расчетные электродинамические характеристики СВЧ-устройства обеспечивают малые потери, что было подтверждено в эксперименте.

Отметим, что такая двухступенчатая процедура расчета имеет еще одно достоинство: характеристики каждого узла могут быть оптимизированы отдельно. В частности, согласующая диафрагма в прямоугольном волноводе изначально была классической прямоугольной. Однако в последствии она была заменена на П-образную диафрагму, что вызвано необходимостью избежать электрического пробоя по щели диафрагмы. А П-образная диафрагма, как показано в [12], обеспечивает такой же коэффициент связи, что и классическая, но с большим (в несколько раз) зазором щели.

С помощью микроволнового модуля, приведенного на рис. 1, изучались свойства инициированного СВЧ-разряда на конце линии Губо, кото-

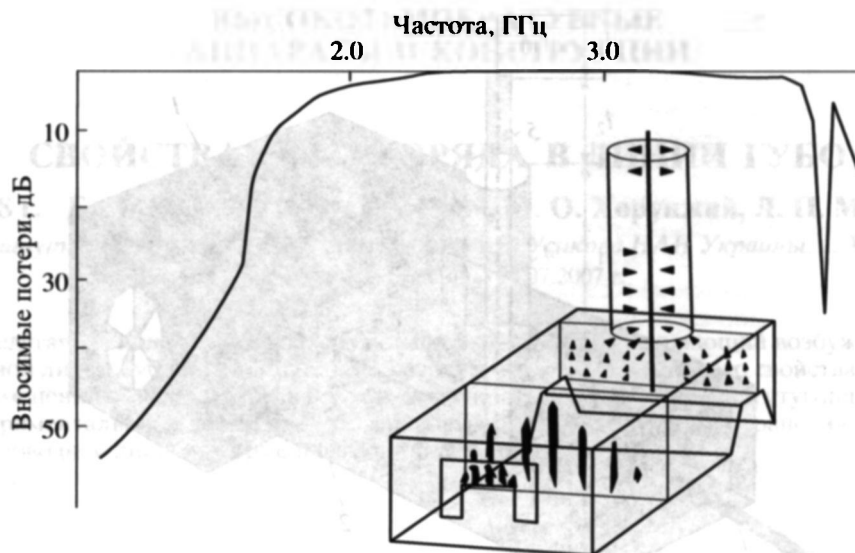


Рис. 2. Зависимость вносимых потерь СВЧ-модуля в рабочем диапазоне частот магнетрона. На вставке показано распределение электрических полей в отдельных поперечных сечениях узла.

рую можно рассматривать как штыревую антенну поверхностных волн, вдоль длины которой укладывается несколько волн. Для реализации свободно локализованного разряда необходимо, чтобы уровень электрической компоненты электромагнитной волны  $E_0$  превышал пробойный порог возбуждения  $E$  (В/см). С этой целью внутренний проводник коаксиальной линии закорачивался широкой стенкой волновода, и тем самым существенно увеличивалась неоднородность поля на конце линии Губо, приводящая к возбуждению разряда.

В эксперименте в качестве однопроводной линии Губо использовались различные тугоплавкие

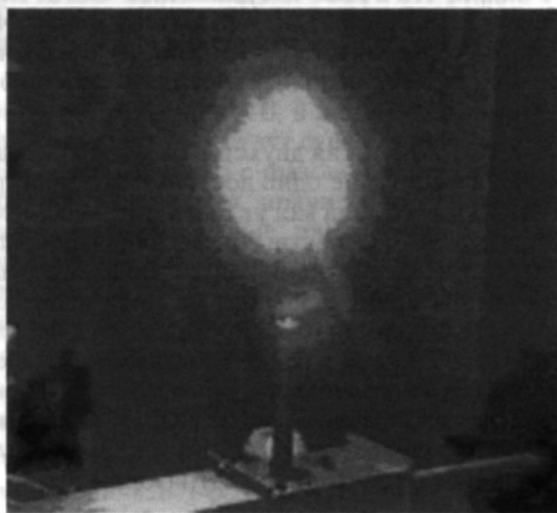


Рис. 3. Волноводно-коаксиальная конструкция СВЧ-модуля и разряд на конце однопроводной линии Губо.

материалы (в скобках указаны температуры плавления): W (3420°C), Ta (3000°C), Mo (2620°C), Ni (1450°C) и др.

На рис. 3 показан один из типовых разрядов на конце вольфрамовой проволоки диаметром 0.4 мм и длиной в три длины волны. Визуальное наблюдение плазмы шарообразной формы возможно только с использованием светофильтров. В данном случае киносъемка разрядного процесса осуществлялась с фильтром "ФС-6" с толщиной стекла 1 мм. Его спектральные характеристики: в диапазоне длин волн 240–480 мкм, при 750 мкм и выше показатель поглощения  $K_\lambda$  порядка 0.32–0.05. В диапазоне 500–700 мкм,  $K_\lambda$  составляет от 1.49 до 1.54. Результаты экспериментов показали, что инициирование СВЧ-разряда в атмосфере для различных материалов определяется в основном температурой плавления проводника: чем выше температура, тем требуется большая подводимая СВЧ-мощность от магнетрона.

Цвет разряда определяется материалом проводника: для меди он красноватый, для вольфрама – белый. Характер разряда в основном эрозионный: материал проводника под действием высокой температуры сублимирует в атмосферу, минуя жидкую фазу. При расположении вблизи разряда различных металлических подложек на них образовывалось мелкодисперсное покрытие. Выбирая материал с хорошей адгезией, можно получать качественные пленки из тугоплавких материалов. Следует отметить, что материал проводника расходуется довольно быстро и составляет для вольфрама диаметром 0.4 мм порядка 1 см/мин. На рис. 4 показана эмблема север-юг-восток-запад в виде тонкой пленки на медной

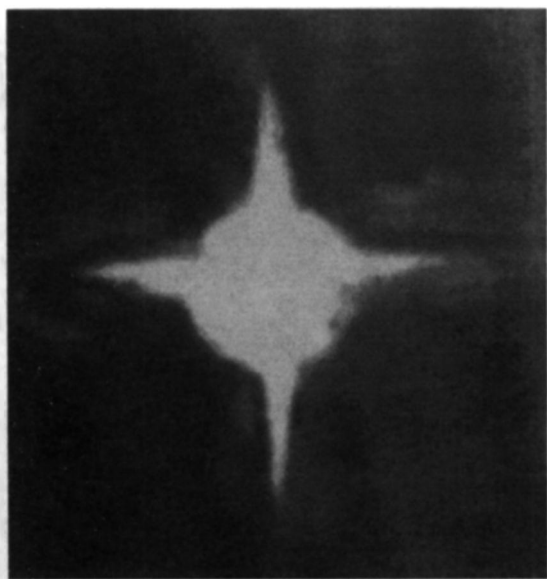


Рис. 4. Фотография эмблемы на металлической подложке в виде мелкодисперсной вольфрамовой пленки.

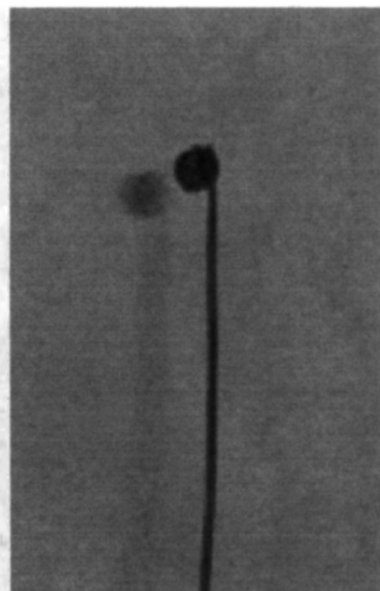


Рис. 5. Вид оплавленного конца проводника из хромель-алюмеля после воздействия СВЧ-разряда.

подложке, полученной методом реактивного распыления.

Испарение материала из проводников в момент выключения установки имеет особенность. На конце проводника, как правило, образуется некое подобие сферы, показанной на рис. 5 для проводника из хромель-алюмеля диаметром 0.5 мм. Перед повторным возбуждением разряда в линии данный образовавшийся расплав шарообразной формы на конце однопроводной линии необходимо удалить. Эта операция улучшает условия иницирования СВЧ-разряда. Чем выше температура плавления материала проводника, тем меньше диаметр головки расплава.

Температуру факельного СВЧ-разряда можно было измерять двумя методами: пирометрическим и методом обращения спектральных линий. Из опытных данных было установлено, что во время разряда существенно усложняется помеховая обстановка, вызванная не только электромагнитным излучением в диапазоне от сантиметрового до видимого, но и электростатическими наводками разрядного процесса. В этой связи применение метода обращения спектральных линий с использованием монохроматора было затруднено. В экспериментах был задействован лабораторный оптический пирометр ЭОП-66, построенный по классической схеме монохроматического пирометра с исчезающей нитью накала. Он допускает измерение яркостных температур по тепловому излучению в видимой части спектра на длине волны 0.65 мкм. Диапазон измеряемых температур этого прибора разрешал регистрировать температуру до 10000°C путем применения поглощающих стекол. Поскольку градуировка

пирометра осуществлялась по излучению черного тела, то измеренная, так называемая яркостная температура будет ниже истинной. Степень черноты  $\epsilon_{\lambda, n}(T)$  меньше единицы, следовательно, тепловое излучение будет слабее. Другие параметры плазмы (концентрация частиц, градиенты плазменных образований, частота столкновений и др.) могут быть измерены с помощью фазометров, интерферометров и локаторов плазмы при условии принятия специальных мер по тщательной экранировке приемозондирующей аппаратуры.

В эксперименте использовались проводники из разных материалов. В большей мере это относится к тугоплавкому вольфраму, так как у него температура плавления  $t_{пл} = 3390^\circ\text{C}$ , температура кипения  $t_{кип} = 5930^\circ\text{C}$ , теплота испарения  $Q_{исп} = 1183$  кал/г, удельное сопротивление  $\rho_{уд} = 5.1 \times 10^8$  Ом/м. Неоднократные измерения температуры факельного СВЧ-разряда показали, что средняя температура составляет около 5000°C. Разряд осуществлялся в атмосфере воздуха и сопровождался напылением вольфрама на подложки в виде мелкоструктурной пленки.

Такой процесс известен в литературе [13] как резистивное распыление. При этом наибольшую часть распыленного соединения составляет окисел вольфрама. Этот метод примечателен как полезными свойствами окислов многих материалов, так и легкостью, с которой можно проводить реактивное распыление в кислороде. Иногда в качестве активного газа используется азот.





Рис. 6. Факельный разряд в однопроводной линии Губо длиной 32 см.

### ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ОДНОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

В целях упрощения СВЧ разрядного устройства, снижения потерь и увеличения длины однопроводной линии модуль, показанный на рис. 1, претерпел некоторые изменения. Внешняя оболочка коаксиальной линии 4 была вообще удалена. Ее внутренний проводник 5 (медная трубка диаметром 3 мм) через круглое окно связи в волноводе 2 телескопически соединялся с вольфрамовым проводником 6.

Данная конструкция была достаточно жесткая и позволяла менять длину и конфигурацию внешнего проводника. Типичный факельный СВЧ-разряд такой измененной конструкции с длиной вольфрамового проводника 32 см показан на рис. 6.

На рис. 7 представлено несколько вариантов конфигураций вольфрамового проводника 6, которые в дальнейшем были использованы в экспериментах. Столь необычные формы проводников появились не случайно. Из электродинамики и теории распространения радиоволн в линиях передачи (волноводы, диэлектрические линии и др.) известно, что изломы и изгибы с радиусом, равным или меньшим длины волны, могут приводить к существенному рассогласованию и переизлучению в свободное пространство от места неоднородности, поэтому наличие в эксперименте проводников с различными неоднородностями в виде изгибов помогло бы ответить на ряд важных вопросов теории распространения волн вдоль однопроводных линий передач. Также важно было

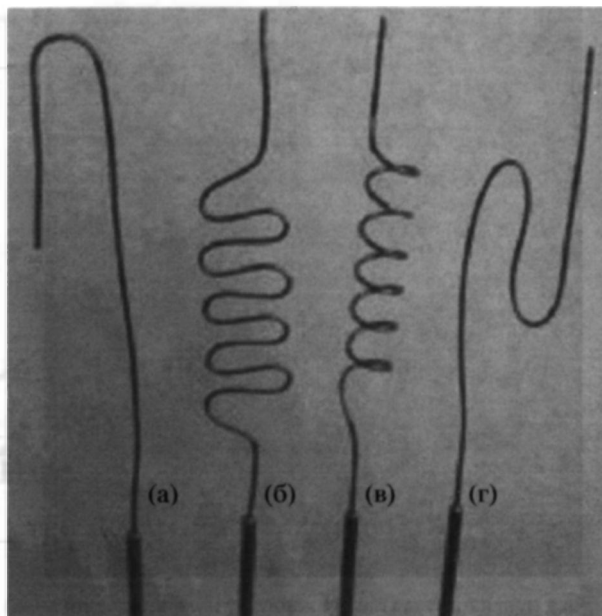


Рис. 7. Несколько геометрических конфигураций линии Губо, демонстрирующих СВЧ-разряд: (а) – линия в виде крючка, (б) – синусоида, (в) – спираль, (г) – петля.

оценить масштаб экспоненциального уменьшения поля поверхностной волны, бегущей вдоль проводника.

Результаты выполненных экспериментов оказались неожиданными. Во всех четырех случаях, представленных на рис. 7, под действием СВЧ-энергии магнетрона факельный разряд возбуждался, несмотря на то что проводники имели участки значительной кривизны. Это обстоятельство свидетельствует об особом характере распространения волны в такой линии.

Кроме того, были сняты отпечатки воздействия распространяющейся СВЧ-энергии вдоль вольфрамового проводника 6 на прессованном картоне толщиной 1 мм (см. рис. 8). Картонный образец был нанизан на вольфрамовую проволоку диаметром 0,4 мм. В момент включения магнетронного генератора в соответствии с плотностью распределения энергии вокруг проводника 6 образовывалось ожоговое пятно небольшого размера. Плотность энергии у поверхности проводника оказалась очень высокая, и несвоевременное включение магнетрона приводило к возгоранию картонного образца. Для сопоставимой оценки размеров полевого ожога предварительно на картоне был начертан круг диаметром 12 мм, показанный на рис. 8.

Подтверждением того, что поле локализовано в тонком приповерхностном слое на границе раздела металл–воздух, является фотография (рис. 9), которая получена в режиме удвоения СВЧ-мощ-

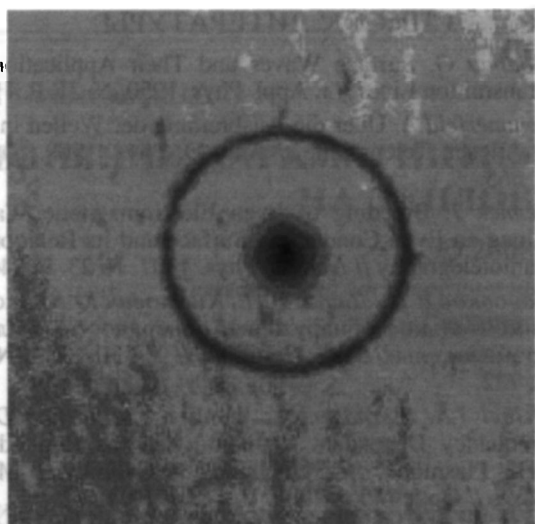


Рис. 8. Энергетический отпечаток на картоне толщиной 1 мм.

ности с магнетрона. На этом кадре четко виден раскаленный проводник в форме спирали, показанной на рис. 7в. Температура вольфрамового проводника-спирали, измеренная оптическим пирометром ЭОП-66, составила 2000°C. Предыдущие снимки, на которых фиксировались разрядные процессы, реализовывались в однополупериодном режиме работы магнетрона, поэтому “термоорол” вокруг проводника на фоне ярко светящегося плазмоида на конце линии был незаметен.

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно отметить ряд закономерностей в поведении разрядного процесса и распространении сигнала вдоль линии передачи.

1. СВЧ-разряд в тонкой (диаметр проводника на три порядка меньше длины волны возбуждающего излучения) однопроводной линии Губо представляет собой эрозионный разряд факельного типа. В случае напыления оксида вольфрама на заземленную металлическую подложку расход материала и яркостная температура распыления и горения (окисления) проводника б на рис. 1 определялась свойствами материала проводника и мощностью источника накачки.

2. Распространение сигнала в однопроводной линии носит сугубо поверхностный характер и большая часть его энергии сосредоточена в очень малом объеме вокруг проводника на границе раздела металл–воздух. Неоднородности проводника в форме различных изгибов не приводят к отрыву сигнала от поверхности, но увеличивают, по-видимому, потери сигнала в скин-слое линии передачи.

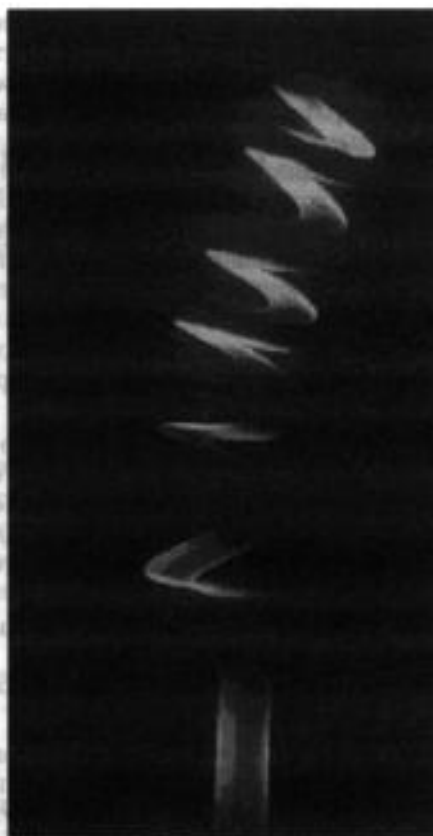


Рис. 9. Контур плазменного образования вокруг проводника-спирали в двухполупериодном режиме работы магнетрона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные свойства распространения СВЧ-энергии в однопроводной линии демонстрируют сложную динамику преобразования объемной волны в поверхностную на очень малом расстоянии от окна связи волновода. Также имеет место перемещение энергии этой волны в нагрузку по сильно искривленному маршруту с возгонкой металла на конце линии при высоком значении электрической компоненты электромагнитного поля и излучением в свободное пространство “остатков” этой энергии.

Учитывая сильный разогрев поверхности проводника, можно предположить появление на границе раздела металл–воздух термоэлектронов, а наличие сильной электрической компоненты электромагнитного поля свидетельствует о возможности автоэмиссии, когда просачивание электронов проводимости из скин-слоя через сниженный потенциальный барьер будет происходить в результате туннелирования. Такая плазмopodobная структура вокруг проводника получила название поверхностной активной среды (ПАС) [14, 15]. В данном случае имеет смысл рассматривать механизм распространения СВЧ-энергии вдоль однопроводной

линии с позиций существования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), которые интенсивно изучаются в коротковолновых диапазонах, в частности в инфракрасном, видимом и терагерцовом [5, 6]. Обычно они существуют на тонких плоских слоях, на цилиндрических и сферических поверхностях, на границах двух сред: с  $\epsilon_1 > 0$  в среде 1 и с  $\epsilon_2 < 0$  в среде 2 при условии, что  $|\epsilon_2| > \epsilon_1$ . Для металлов и легированных полупроводников с высокой концентрацией свободных носителей это неравенство выполняется в широком диапазоне частот от ИК и видимого до рентгеновского спектра, в котором металл становится прозрачным и ППП не возбуждаются [15, 16].

Со стороны низких частот такого ограничения нет. Возможно, поэтому данный случай можно рассматривать с позиций существования поверхностных плазмон-поляритонов. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\epsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{\text{кр}}^2}{\omega^2} < 0, \text{ т.е. частота волны накачки } \omega \text{ была меньше критической плазменной частоты } \omega_{\text{кр}}$$

среды 2.

Известно также [17], что большое влияние на образование и распространение плазмон-поляритонов вдоль тонкой проволоки оказывают переходные слои и тонкие пленки металлоподобных окислов, которые обеспечивают условия для реализации отрицательного показателя преломления. Как показали эксперименты, сразу после включения магнетрона металлическая проволока сильно нагревается (см. рис. 9) и, вступая в реакцию с кислородом воздуха, образует окисную пленку на поверхности проводника. В такой среде (слое) резко уменьшается количество электронов проводимости, что приводит к реализации условия  $\omega_{\text{кр}} > \omega$ .

Таким образом, следует отметить, что обнаруженное движение СВЧ-энергии в форме поверхностных плазмон-поляритонов от магнетрона к нагрузке по однопроводной линии Губо может быть использовано для изучения свойств различных металлов, диэлектриков и полупроводниковых структур.

Авторы выражают благодарность проф. А.А. Булгакову за интерес к работе, проф. А.В. Кацу и С.Г. Гестрину за полезные обсуждения и критические замечания.

Данные исследования частично поддержаны научно-техническим центром в Украине (проект УНТЦ № 3979).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goubau G.* Surface Waves and Their Application to Transmission Lines // *J. Appl. Phys.* 1950. № 21. P. 1119.
2. *Sommerfeld A.* Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie // *Ann. D. Phys.* 1909. № 28. P. 665.
3. *Zennek J.* Breeding of Even Electromagnetic Waves Along an Even Conducting Surface and Its Relation to Radiotelegraphy // *Ann. D. Phys.* 1907. № 23. P. 846.
4. *Байбаков В.И., Дацко В.Н., Кустович Ю.В.* Экспериментальное обнаружение поверхностных электромагнитных волн Ценника // *УФН.* 1989. № 4. С. 722.
5. *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.
6. *Mater S.A., Andrews S.R., Moreno M.L.* Terahertz Surface Plasmon-Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires // *Phys. Rev. Lett.* 2006. № 97. P. 176.
7. *Рейтер Г.* Электронные лавины и пробой в газах / Под ред. Комелькова В.С. М.: Мир, 1968. 390 с.
8. *Браун С.* Элементарные процессы в плазме газового разряда / Под ред. Смолян Г.Л. М.: Гос. изд-во лит. в обл. атомн. техники, 1961. 324 с.
9. *Мак-Дональд А.* Сверхвысокочастотный пробой в газах / Под ред. Рабиновича М.С. М.: Мир, 1969. 212 с.
10. *Кириченко А.Я., Мартынюк С.П., Моторенко А.П. и др.* Инициированный сферический СВЧ-разряд при атмосферном давлении // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28. № 15. С. 55.
11. *Бардош Л., Лебедев Ю.А.* Электронный шаровой СВЧ-разряд. Феноменология и результаты зондовых измерений // *ЖТФ.* 1998. Т. 68. № 12. С. 29.
12. *Мосьян Л.П.* П-образная диафрагма в прямоугольном волноводе // *Сб. науч. тр. / НАН Украины. ИРЭ НАНУ.* Харьков, 1996. Т. 1. С. 34.
13. *Технология тонких пленок / Под ред. Майселла Л., Гленча Р. М.: Сов. радио, 1977. 662 с.*
14. *Физический энциклопедический словарь / Под ред. Прохорова А.М. М.: Сов. энц., 1984. 994 с.*
15. *Физическая энциклопедия / Под ред. Прохорова А.М. М.: БРЭ, 1998. 995 с.*
16. *Зуев В.С.* Поверхностные поляритоны и плазмоны: спонтанное излучение атома вблизи тела малого размера. Препринт № 3. М.: ФИАН, 2006. 15 с.
17. *Логачева Е.И., Макин В.С., Конс П.* Роль поверхностных плазмон-поляритонов в поглощении излучения тонкими металлическими проволочками // *Тр. конф. "Прикладная оптика – 2006". СПб.: Опт. об-во им. Д.С. Рождественского, 2006. С. 191.*