

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.372

О СЕЛЕКТИВНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ НЕСОБСТВЕННЫХ ВОЛН КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

© 2020 г. В. А. Малахов^а, А. С. Нечаев^{а, б}, А. А. Никитин^б, А. С. Раевский^{а, *}, С. Б. Раевский^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация

^бФилиал Российского Федерального ядерного центра-Всероссийского научно-исследовательского института
экспериментальной физики Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова,
ул. Тropicина 47, Нижний Новгород, 603137 Российская Федерация

*E-mail: raevsky@nntu.ru

Поступила в редакцию 26.12.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 21.01.2020 г.

На примере вытекающей волны E_{01} приведены результаты экспериментального исследования селективного возбуждения несобственных волн и вытекающей волны круглого открытого диэлектрического волновода.

DOI: 10.31857/S0033849420110121

Круглый открытый диэлектрический волновод (ОДВ) является одной из широко используемых открытых электродинамических направляющих структур СВЧ- и КВЧ-диапазонов волн. В большинстве работ, посвященных его исследованию, он рассматривался в основном как структура, направляющая поверхностные волны (основной тип волн, на которых осуществляется перенос энергии в ОДВ), поля которых убывают в радиальном направлении [1]. Однако, в настоящее время проявляется значительный интерес к устройствам, работающим на вытекающих волнах [2–4].

Вытекающие волны – это быстрые волны, дисперсионные характеристики которых являются продолжениями характеристик поверхностных волн ОДВ на частотах ниже критических последних. Вытекающие волны – несобственные волны, они не удовлетворяют условию излучения и, по-

этому, имеют нарастающее по радиальной координате поле [1].

Одной из проблем, стоящей перед исследователями, является проблема селективного возбуждения таких волн, так как они являются волнами высших типов и существуют совместно с поверхностными волнами, в частности, с основной волной HE_{11} . В данной работе представлена установка, предназначенная для возбуждения вытекающей волны E_{01} круглого открытого ДВ, и приведены результаты экспериментальных исследований ее характеристик.

Для возбуждения вытекающей волны E_{01} круглого ОДВ использовалась электродинамическая структура, показанная на рис. 1, имеющая следующие составные части и параметры: 1 – металлический стержень длиной $L_1 = 0.1$ м с радиусом $a = 0.005$ м; 2 – круглый экранированный волновод длиной $L_1 + L_2 = 0.15$ м с радиусом $R = 0.03$ м; 3 –

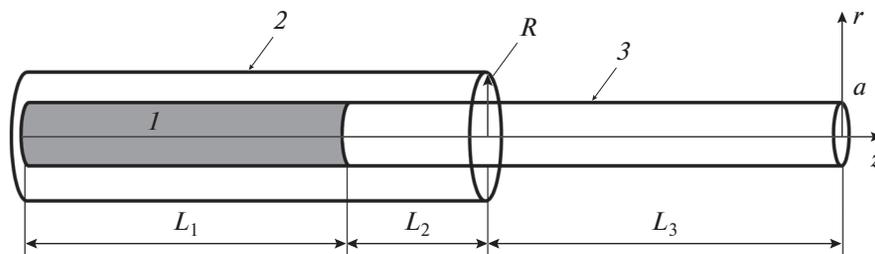


Рис. 1. Исследуемая электродинамическая структура.

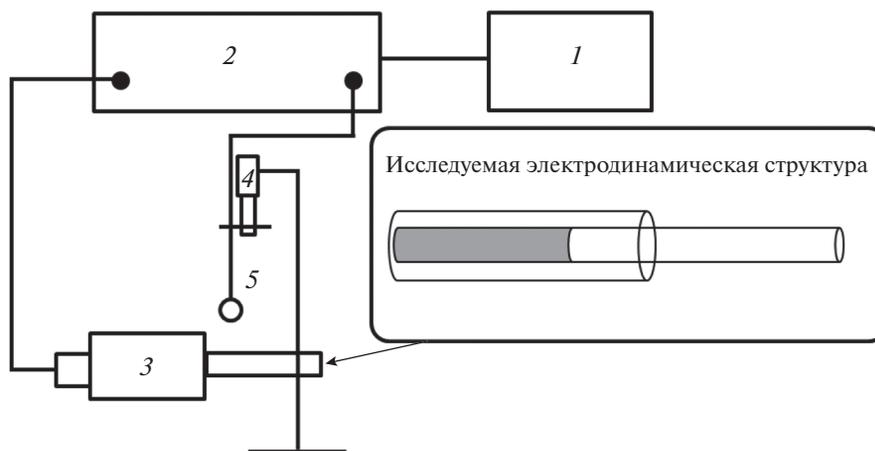


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки.

диэлектрический стержень длиной $L_2 + L_3 = 0.24$ м с радиусом $a = 0.005$ м (относительная диэлектрическая проницаемость стержня, изготовленного из фторопласта, $\epsilon = 2.1$).

На участке длиной L_1 оси z электродинамическая структура представляет собой круглый коаксиальный волновод, на участке длиной L_2 – круглый экранированный двухслойный волновод, а на участке длиной L_3 – круглый открытый ДВ.

Размеры элементов электродинамической структуры подобраны таким образом, чтобы в исследуемом частотном диапазоне (6...8 ГГц), выбор которого определяется используемым измерительным оборудованием, существовала вытекающая волна E_{01} круглого ОДВ. При этом влияние основной волны на структуру поля будет минимальным: эффективный показатель преломления для волны HE_{11} примерно равен единице, и электродинамическая структура на этой волне теряет направляющие свойства.

На рис. 2 показана структурная схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – векторный анализатор цепей OBZOR 804/1; 3 – исследуемая электродинамическая структура; 4 – держатель измерительного элемента с микрометром; 5 – петлевой зонд.

Для определения частотных диапазонов существования симметричной волны E_{01} круглого двухслойного экранированного волновода, поверхностной и вытекающей волны E_{01} круглого ОДВ, с использованием строгого электродинамического подхода, были решены дисперсионные задачи для круглого двухслойного экранированного волновода и круглого ОДВ [1].

На рис. 3 приведены дисперсионные характеристики (β_1/k_0) и характеристики затухания $(\beta_2 a)$ волн ОДВ и двухслойного экранированного волновода, где β_1 – действительная, а β_2 – мнимая

части продольного волнового числа, которое в общем случае является комплексной величиной $\beta = \beta_1 + i\beta_2$, k_0 – волновое число свободного пространства. Чтобы дисперсионная характеристика вытекающей волны E_{01} круглого ОДВ (штриховая линия) была хорошо видна, дисперсионные характеристики волн круглого двухслойного экранированного волновода: HE_{11} , H_{01} , E_{01} и EH_{11} изображались до частоты ≈ 7 ГГц.

Из рис. 3 определяем диапазон частот, в котором существует вытекающая волна круглого ОДВ, от 6 до 10 ГГц (несобственная волна – быстрая). Измерения проводились в диапазоне от 6 до 8 ГГц. Верхний предел частотного диапазона определяется характеристиками анализатора цепей OBZOR 804/1.

В выбранном частотном диапазоне в круглом двухслойном экранированном волноводе могут существовать волны HE_{11} , H_{01} , E_{01} , EH_{11} , в круглом ОДВ волна HE_{11} и бесконечное множество несобственных волн, в том числе, вытекающая волна E_{01} (рис. 3). Исследуемая электродинамическая структура позволяет создать условия возбуждения, при которых в круглом открытом ДВ основной вклад в формирование суммарного электромагнитного поля будет вноситься вытекающей волной E_{01} .

В коаксиальном волноводе возбуждается T -волна. Структура электромагнитного поля в поперечном сечении T -волны схожа со структурой поля симметричной волны E_{01} круглого экранированного двухслойного волновода, поэтому на участке L_2 возбуждается волна E_{01} и основная волна HE_{11} . Электрическое поле волны HE_{11} круглого двухслойного экранированного волновода в поперечном сечении имеет максимум в центре двухслойного волновода [1], но данный волновод состыкован с коаксиальным волноводом, в центре которого

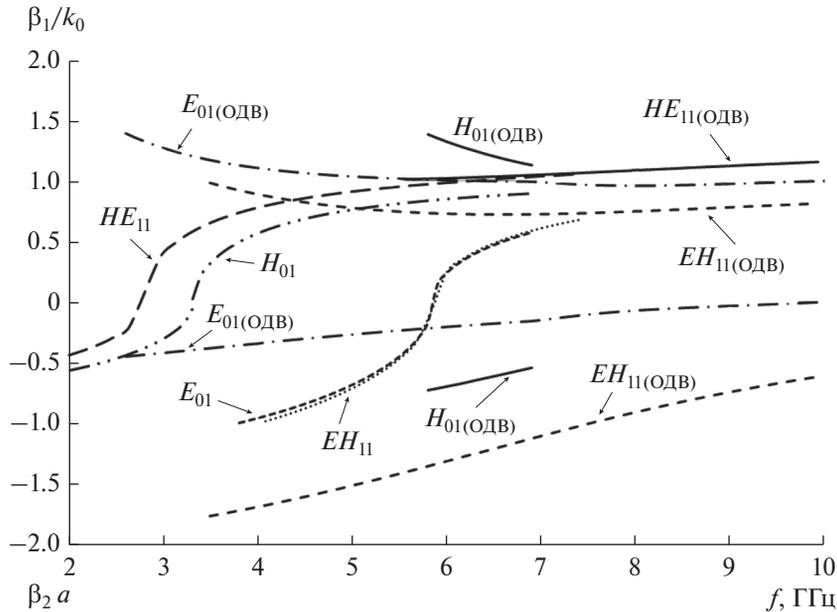


Рис. 3. Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волн открытого ДВ (указаны как ОДВ) и двухслойного экранированного волновода.

расположен металлический стержень, что не благоприятствует возбуждению волны HE_{11} круглого двухслойного экранированного волновода.

Структура поля волны E_{01} круглого двухслойного экранированного волновода схожа со структурой поля вытекающей волны E_{01} ОДВ, поэтому в частотном диапазоне от 6 до 8 ГГц в открытом ДВ будет, преимущественно, возбуждаться вытекающая волна E_{01} . Расчеты, проведенные в системах автоматизированного проектирования ANSYS HFSS и COMSOL Multiphysics, показали, что основной вклад в структуру суммарного электромагнитного поля вносят волны HE_{11} и E_{01} . На низких частотах выбранного частотного диапазона основное влияние на распределение суммарного электромагнитного поля в круглом ОДВ оказывает вытекающая волна E_{01} , а на высоких частотах — волна HE_{11} .

В диапазоне существования волны E_{01} круглого двухслойного экранированного волновода существуют также волны H_{01} и EH_{11} (рис. 3), но структура поля этих волн принципиально отличается от структуры поля T -волн коаксиального волновода, и вклад в формирование суммарного электромагнитного поля этими волнами, как и волнами высших типов экранированного двухслойного волновода, в рассматриваемом частотном диапазоне значительно меньше, чем волн E_{01} и HE_{11} .

Все измерения произведены при уровне мощности 1 мВт на входе коаксиального волновода, на расстоянии 3 мм от торца экранированного

двухслойного волновода с помощью жесткого коаксиального кабеля с петлевым зондом. Коаксиальный кабель был закреплен на микрометре, с помощью которого осуществлялось перемещение петлевого зонда вдоль радиальной и продольной координат исследуемой структуры. На рис. 4 приведена фотография экспериментальной установки.

Результаты экспериментальных исследований влияния вытекающей волны E_{01} и основной волны HE_{11} на распределение суммарного поля приведены на рис. 5–6.

На рис. 5 приведены зависимости нормированной напряженности магнитного поля от радиальной координаты r , измеренные на различных частотах. Из рисунка следует, что на частоте 6.3 ГГц (кружки) структура суммарного поля определяется вытекающей волной E_{01} , так как наблюдается увеличение напряженности магнитного поля с увеличением расстояния от диэлектрического стержня вдоль радиальной координаты. Дальнейшее уменьшение напряженности магнитного поля с увеличением расстояния объясняется тем, что вытекание энергии происходит со стержня, имеющего конечную длину [5]. На частотах 7.5 ГГц (звездочки) и 8 ГГц (треугольники) структура поля определяется поверхностной волной HE_{11} открытого ДВ, так как происходит убывание поля вдоль радиальной координаты. Такое поведение поля характерно для поверхностных волн.

На рис. 6 представлены зависимости нормированной напряженности магнитного поля от продольной координаты z на различных частотах.



Рис. 4. Фотография экспериментальной установки.

Как следует из рисунка, на частоте 6.3 ГГц (кружки) происходит уменьшение напряженности магнитного поля, что характерно для вытекающей волны вследствие излучения энергии в поперечном направлении. На частоте 8 ГГц (треугольники) характеристика имеет максимумы и минимумы, что характерно для поверхностной волны, распространяющейся вдоль диэлектрического стержня и отражающейся от открытого конца в обратном направлении.

Были так же произведены измерения зависимости напряженности магнитного поля от радиальной координаты при разных значениях угловой

координаты в цилиндрической системе координат (петлевой зонд вращался вокруг продольной оси z ДВ) на частоте 6.3 ГГц. Результаты исследований показали, что измеряемые напряженности при разных значениях угловой координаты численно совпадают друг с другом. Следовательно, на частоте 6.3 ГГц структура суммарного поля имеет симметричный характер, т.е. определяется симметричной вытекающей волной E_{01} открытого ДВ.

С помощью рупорной антенны на частоте 6.3 ГГц были произведены измерения диаграммы направленности диэлектрического излучателя, которые показали, что в радиальном направле-

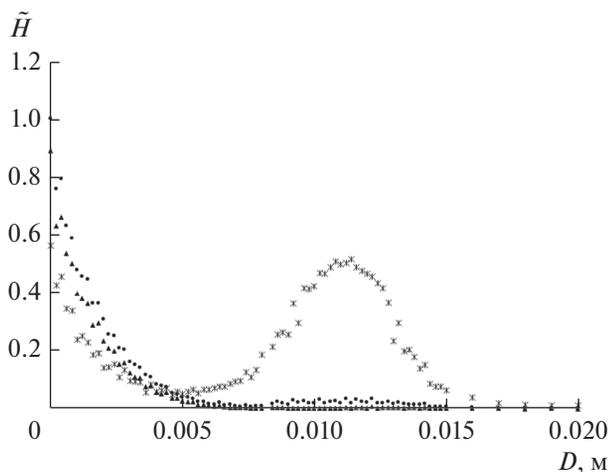


Рис. 5. Зависимости нормированной напряженности магнитного поля от радиальной координаты r , измеренные на частотах: 6.3 ГГц (кружки), 7.5 ГГц (звездочки) и 8 ГГц (треугольники).

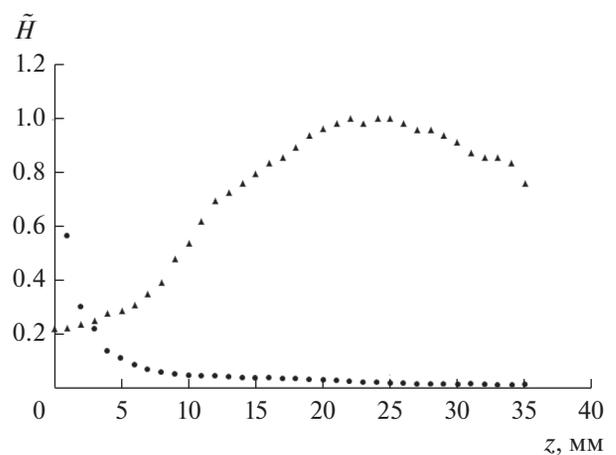


Рис. 6. Зависимости нормированной напряженности магнитного поля от продольной координаты z , измеренные на частотах: 6.3 ГГц (кружки) и 8 ГГц (треугольники).

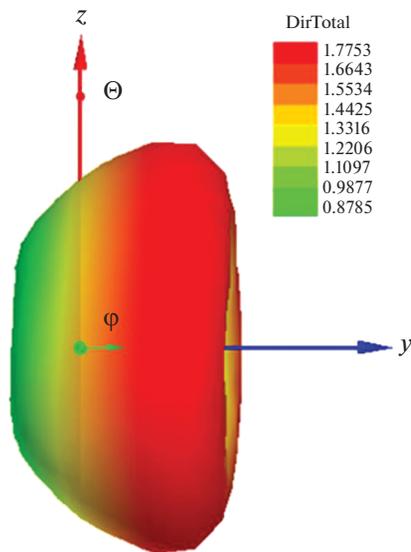


Рис. 7. Диаграмма направленности рассматриваемой электродинамической структуры, полученная в САПР ANSYS HFSS.

нии мощность излучения на 20 дБ больше, чем в продольном. Этот факт говорит о том, что на частоте 6.3 ГГц большая доля энергии излучается в радиальном направлении, что также характерно для вытекающих волн.

На рис. 7 приведена диаграмма направленности рассматриваемой электродинамической структуры, которую можно рассматривать как излучатель на

вытекающей волне на частоте 6.3 ГГц. Из рис. 7 видно, что излучение в основном происходит в поперечном направлении.

На основании схожести структур полей волн HE_{11} коаксиального волновода, E_{01} круглого экранированного волновода с диэлектрическим стержнем и волны E_{01} ОДВ предложен способ возбуждения последней в диапазоне частот, где она является вытекающей. Проведенные численные и экспериментальные исследования устройства возбуждения показали возможность создания на его основе диэлектрической антенны, имеющей осесимметричную диаграмму направленности. Управление положением максимума излучения может осуществляться путем изменения частоты. При этом используется свойство вытекающей волны: с уменьшением частоты растет затухание волны, обусловленное потерями на излучение. В результате увеличивается угол, образуемый вектором Умова–Пойнтинга с осью ОДВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раевский А.С., Раевский С.Б. Комплексные волны. М.: Радиотехника, 2010.
2. Fuscaldo W., Tofani S., Zografopoulos D. et al. // IEEE Trans. 2018. V. AP-66. № 3. P. 1169.
3. Tierney B., Grbic A. // IEEE Trans. 2018. V. AP-66. № 4. P. 2143.
4. Sengupta S., Jackson D., Long S. // IEEE Trans. 2018. V. MTT-66. № 3. P. 1181.
5. Унгер Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1988.