

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

*Нечаев Артем Сергеевич (niiis@niiis.nnov.ru)*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Представлена конструкция экспериментального устройства, предназначенного для селективного возбуждения вытекающих волн круглого открытого диэлектрического волновода. Приведены результаты моделирования в САПР исследуемой установки и экспериментального исследования ее характеристик. Показано, что на исследуемых частотах возможно возбуждение вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого диэлектрического волновода.

**Ключевые слова:** вытекающие волны, диэлектрический волновод, моделирование в САПР.

## CHARACTERISTICS RESEARCH OF THE EXCITATION DEVICE OF A LEAKY WAVE OF A ROUND OPEN DIELECTRIC WAVEGUIDE

*Nechaev Artyom Sergeevich (niiis@niiis.nnov.ru)*

Branch of RFNC – VNIIEF «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»,  
Nizhny Novgorod

The design of the experimental device designed for the selective excitation of leaky waves of a round open dielectric waveguide is presented. The results of studied setup CAD modeling and experimental study of its characteristics are given. It is shown that the excitation of the  $E_{01}$  leaky wave of a round open dielectric waveguide is possible at the studied frequencies.

**Key words:** leaky waves, dielectric waveguide, CAD modeling.

### Введение

Круглый открытый диэлектрический волновод (ДВ) 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 ДВ), 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 ДВ на частотах ниже критических. Вытекающие волны являются несобственными, они не удовлетворяют

условию излучения и, поэтому, 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  $HE_{11}$  круглого открытого ДВ. В данной работе представлена экспериментальная установка, предназначенная для селективного возбуждения вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого ДВ, приведены результаты моделирования в САПР и результаты экспериментального исследования характеристик.

### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 показана структурная схема экспериментальной установки.

Для возбуждения вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого ДВ использовалась экспериментальная установка (исследуемая электродинамическая структура), показанная на рис. 1 в дополнительном окне, 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 – диэлектрический стержень длиной  $L_2 + L_3 = 0,24$  м с радиусом  $a = 0,005$  м (относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 2,1$ ).

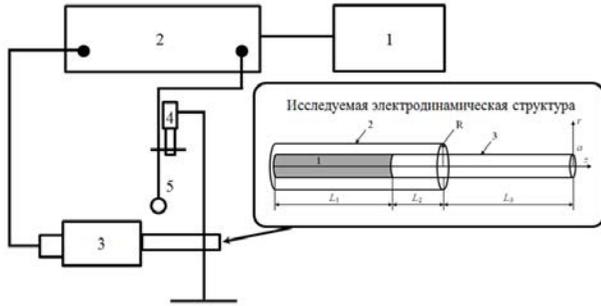


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – векторный анализатор цепей OBZOR 804/1; 3 – исследуемая установка; 4 – держатель измерительного элемента с микрометром; 5 – петлевой зонд

В интервале  $L_1$  вдоль оси  $z$  электродинамическая структура представляет собой круглый коаксиальный волновод, в интервале  $L_2$  – круглый экранированный двухслойный волновод (ЭДВ), а на участке  $L_3$  – круглый открытый двухслойный волновод (ОДВ).

Размеры элементов экспериментальной установки подобраны таким образом, чтобы в исследуемом частотном диапазоне (6–8 ГГц), выбор которого определяется используемым измерительным оборудованием, существовала вытекающая волна  $E_{01}$  круглого открытого ДВ, а влияя основной волны  $HE_{11}$  и других волн высших типов, также являющихся вытекающими, на структуру поля было минимальным: эффективный показатель преломления для волны  $HE_{11}$  примерно равен единице, и электродинамическая структура теряет направляющие свойства.

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

Диапазон частот, в котором существует вытекающая волна круглого ОДВ – от 6 до 10 ГГц. Измерения проводились в диапазоне от 6 до 8 ГГц, так как верхний предел исследуемого частотного диапазона определяется ограничениями анализатора цепей OBZOR 804/1.

На рис. 2 приведены дисперсионные характеристики ( $\beta_1/k_0$ ) и характеристики затухания ( $\beta_2 a$ ) волн круглого ОДВ и круглого ЭДВ, где  $\beta_1$  – действительная, а  $\beta_2$  – мнимая части продольного волнового чис-

ла, 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 (штрихпунктирная линия) была хорошо видна, дисперсионные характеристики волн круглого ЭДВ:  $HE_{11}$ ,  $H_{01}$ ,  $E_{01}$  и  $EH_{11}$  изображались до частоты 7 ГГц.

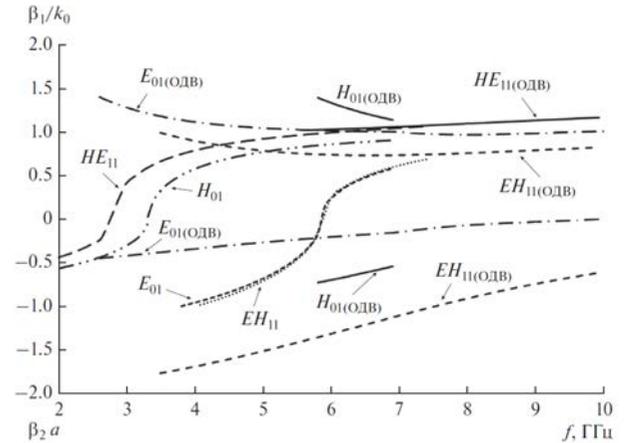


Рис. 2. Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волн круглого ОДВ и круглого ЭДВ

В исследуемом частотном диапазоне круглого ЭДВ могут существовать волны  $HE_{11}$ ,  $H_{01}$ ,  $E_{01}$ ,  $EH_{11}$ , круглого ОДВ – волна  $HE_{11}$  и бесконечное множество несобственных волн, в том числе, вытекающая волна  $E_{01}$  (рис. 2).

Исследуемая установка 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 ЭДВ, поэтому на участке  $L_2$  возбуждается волна  $E_{01}$  и основная волна  $HE_{11}$ . Электрическое поле волны  $HE_{11}$  круглого ЭДВ в поперечном сечении имеет максимум в центре двухслойного волновода [1], но он состыкован с коаксиальным волноводом, в центре которого расположен металлический стержень, что не благоприятствует возбуждению волны  $HE_{11}$  круглого ЭДВ.

Структура поля волны  $E_{01}$  круглого ЭДВ схожа со структурой поля вытекающей волны  $E_{01}$  круглого ОДВ, поэтому в частотном диапазоне от 6 до 8 ГГц круглого ОДВ будет возбуждаться преимущественно вытекающая волна  $E_{01}$ .

В диапазоне существования волны  $E_{01}$  круглого ЭДВ существуют также волны  $H_{01}$  и  $EH_{11}$  (рис. 2), но структура поля этих волн принципиально отличается от структуры поля  $T$ -волны коаксиального волновода и вклад в формирование суммарного электромагнитного поля этими волнами в исследуемом частотном диапазоне значительно меньше, чем волн  $E_{01}$  и  $HE_{11}$ .

Модель исследуемой электродинамической структуры с учетом параметров составных частей была создана в САПР (рис. 3) для дальнейшего расчета диаграмм направленности на различных частотах.

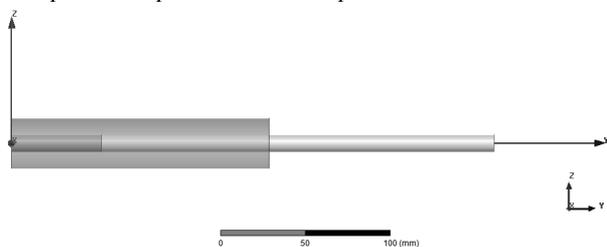


Рис. 3. Модель исследуемой структуры в САПР

Полученные в ходе расчетов диаграммы направленности исследуемой электродинамической структуры, приведены на рис. 4.

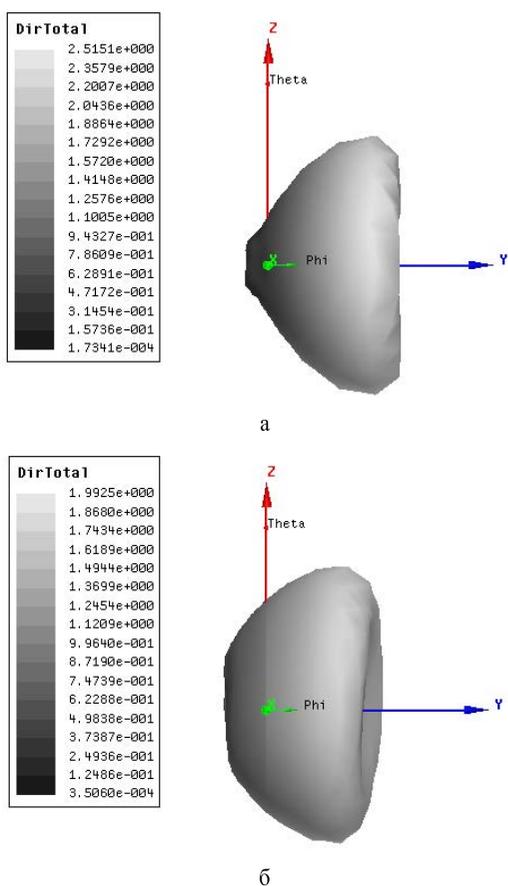


Рис. 4. Диаграммы направленности рассматриваемой электродинамической структуры а – на частоте 6,3 ГГц, б – на частоте 8 ГГц

Из рис. 4, следует, что излучение на частоте 6,3 ГГц, рис.4,а, происходит в основном в поперечном направлении, а на частоте 8 ГГц, рис.4,б, – как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Такое поведение на низких частотах исследуемого частотного диапазона можно объяснить влиянием на структуру суммарного электромагнитного

поля преимущественно вытекающей волны, а на более высоких частотах – преимущественно поверхностной волны.

### Результаты экспериментальных исследований

Измерения характеристик вытекающих волн 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.

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.

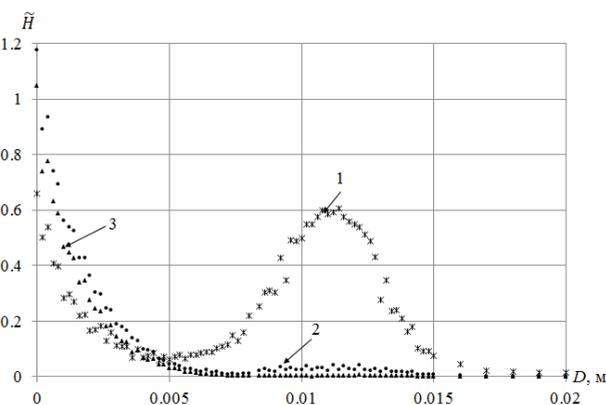


Рис. 5. Зависимость нормированной напряженности магнитного поля от радиальной координаты  $r$ : 1 – 6,3 ГГц (звезды), 2 – 7,5 ГГц (круги), 3 – 8 ГГц (треугольники)

Из рис. 5 следует, что на частоте 6,3 ГГц 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 более высоких частотах структура поля определяется поверхностной волной  $HE_{11}$ , так как происходит убывание поля вдоль радиальной координаты, что характерно для поверхностных волн.

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

Из рис. 6 следует, что на частоте 6,3 ГГц происходит уменьшение напряженности магнитного поля с увеличением  $z$ , что характерно для вытекающей

волны (вследствие излучения энергии в поперечном направлении). На частоте 8 ГГц характеристика имеет максимумы и минимумы, что характерно для поверхностной волны, распространяющейся вдоль диэлектрического стержня и отражающейся от открытого конца в обратном направлении.

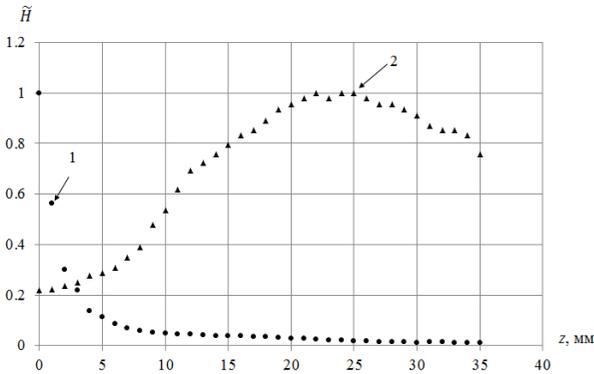


Рис. 6. Зависимость нормированной напряженности магнитного поля от продольной координаты  $z$ : 1 – 6,3 ГГц (кружки), 2 – 8 ГГц (треугольники)

Кроме этого, были произведены измерения зависимости напряженности магнитного поля от угловой координаты на частоте 6,3 ГГц. Результаты исследований показали, что измеряемые напряженности при разных значениях угловой координаты численно совпадают. Следовательно, структура суммарного поля имеет симметричный характер, т. е. определяется симметричной вытекающей волной  $E_{01}$  ОДВ.

### Выводы

Результаты моделирования и экспериментальных исследований характеристик устройства возбу-

ждения вытекающей волны круглого ОДВ говорят о том, что на частоте 6,3 ГГц структура суммарного поля определяется вытекающей волной, а на более высоких частотах 8 ГГц – поверхностной волной. Симметричный характер поля, создаваемого экспериментальной установкой, позволяет сделать вывод о том, что частоте 6,3 ГГц возбуждается преимущественно симметричная вытекающая волна  $E_{01}$  круглого ОДВ.

Так как диаграмма направленности исследуемой экспериментальной установки изменяется при изменении частоты входного сигнала, данное устройство можно использовать в качестве диэлектрической стержневой антенны с диаграммой направленности, управляемой частотой.

### Список литературы

1. Раевский А. С., Раевский С. Б. Комплексные волны. М.: Радиотехника, 2010.
2. Fuscaldo W, Tofani S., Zografopoulos D. et al. Systematic design of THz leaky-wave antennas based on homogenized metasurfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66 (3). P. 1169–1178.
3. Tierney B., Grbic A. Controlling leaky waves with 1-D cascaded metasurfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66 (4). P. 2143–2146.
4. Sengupta S., Jackson D., Long S. Modal analysis and propagation characteristics of leaky-waves on a 2-D periodic leaky-wave antenna // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66 (3). P. 1181–1191.
5. Унгер Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1988.