

УДК 621.372.824

Е.В. Хорошилов

Y-образная диэлектрическая СВЧ-опора для круглых коаксиальных волноводов

Представлены результаты численных расчётов, полученных при электромагнитном и механическом моделировании, а также при экспериментальном прототипировании Y- и O-образных диэлектрических СВЧ-опор из материалов Rexolite 1422 и Ultem PEI 1000. Опоры предназначены для применения в конструкциях круглых коаксиальных волноводов, в частности, в работе описано применение в коаксиальных соединителях с воздушным заполнением, сечением 1,85/0,804 мм и рабочим диапазоном частот от 0 до 67 ГГц.

Ключевые слова: диэлектрическая шайба, диэлектрическая СВЧ-опора, коаксиальный соединитель, граничная частота.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-1-52-58

Одним из главных требований, предъявляемых к измерительной радиоаппаратуре на сверхвысоких и крайне высоких частотах, является низкий уровень отражённых сигналов, возникающих в их радиоизмерительных трактах. Для его обеспечения в них широко используют множество различных устройств [1], в конструкции которых применены отрезки коаксиальных волноводов: переходы различных типов, кабели, соединители и др.

Коаксиальные соединители с воздушным заполнением позволяют получить на частотах вплоть до 110 ГГц низкий уровень коэффициента отражения, значение которого в первую очередь ограничивается применяемыми в их конструкции диэлектрическими опорами (ДО). Несмотря на то, что они увеличивают рассогласованность, их применение необходимо для фиксации центрального проводника волновода соединителя.

Широкое распространение получили ДО, применяемые в конструкции коаксиальных соединителей с воздушным диэлектрическим заполнением [2–4]. Они представляют собой втулку (шайбу, кольцо) из диэлектрического материала, встроенную в волновод соединителя. Её соосные цилиндрические поверхности плотно совмещаются с поверхностями внешнего и внутреннего проводников коаксиального волновода (КК), обеспечивая надёжную фиксацию относительного положения последних. В качестве материалов ДО используются полимерные материалы PEI (полиэфиримид), PS (полистерен), PEEK (полиэфирэфиркетон) Арфлон AR200 [5], Ремамид [6] и др. [7].

Вопросам реализации ДО уделяется большое внимание, поскольку от них в значительной мере зависят эксплуатационные характеристики всего устройства, в котором они применяются. Создание ДО главным образом сосредоточено на поиске геометрической конфигурации, удовлетворяющей предъявляемые к ДО и КК механические и электродинамические требования. Поиск усложняется противоречивостью этих требований. С одной стороны, ДО должны быть максимально прочными для надёжной фиксации центрального проводника ДО после и

во время различных механических воздействий. С другой стороны, они должны вносить минимальное отражение и ослабление, а также обеспечивать необходимую граничную частоту работы КК, в котором они установлены. Первое требование достигается увеличением количества материала, применяемого в конструкции ДО (увеличение длины и внешнего диаметра опоры) и минимальным использованием дополнительных согласующих элементов конструкции; второе – противоположными мерами.

Для достижения строгих эксплуатационных параметров, предъявляемых к прецизионным соединителям измерительного СВЧ-оборудования, в их конструкции широко применяются O-образные ДО в виде шайб (рис. 1), на торцевых поверхностях которых выполнены согласующие кольцевые проточки и внеосевые отверстия.

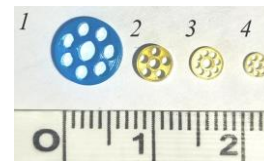


Рис. 1. ДО, применяемые в конструкции коаксиальных соединителей, различных стандартных сечений проводников: 1 – 7/3,04; 2 – 3,5/1,52; 3 – 2,92/1,29 и 4 – 2,4/1,04 мм

Однако применение ДО O-образной геометрии из материалов с относительной диэлектрической проницаемостью выше ~ 3 в прецизионных коаксиальных соединителях с рабочим диапазоном свыше 65 ГГц становится проблематичным – толщина стенок между согласующими внеосевыми отверстиями оказывается неприемлемо тонкой. В качестве одного из путей решения проблемы в этой работе предлагаются Y-образные ДО для круглых коаксиальных волноводов с воздушным заполнением, сечением 1,85/0,804 мм и диапазоном рабочих частот от 0 до 67 ГГц и выше.

Электромагнитное моделирование

Распространение СВЧ/КВЧ электромагнитных волн в направляющих системах относится к макроскопическим процессам, математическое описание

которых основано на решении систем уравнений Максвелла. Их аналитические решения находятся для ограниченного набора направляющих систем с простой геометрией [8].

Для нахождения решений в случаях более сложной геометрии и многослойных цилиндрических направляющих систем [9, 10] широко применяются строгие электродинамические и численные методы, реализованные в современных программных пакетах для моделирования электродинамических процессов [11, 12]. Суть методов заключается в разбиении расчётной области на дискретные ячейки для преобразования уравнений Максвелла в удобную для компьютерных вычислений форму.

В нашем случае расчётные области (рис. 2, а) состоят более чем из 50 тыс. тетраэдров и представляют собой направляющие системы, образованные пространством между коаксиально расположенными внутренней (1) и внешней (2) цилиндрическими проводящими поверхностями с диаметрами 1,85 и 0,804 мм, в середине которых размещены модели O-образной (рис. 2, б) и предлагаемой Y-образной ДО (рис. 2, в).

Боковая поверхность Y-образной ДО образована совокупностью цилиндрических поверхностей: основная (поз. 4) усечена тремя дополнительными (5), образующими «спицы» опоры, причём их оси равноудалены друг от друга и от оси основной поверхности. На торцевых поверхностях выполнены кольцевые проточки и сквозные цилиндрические отверстия: три (6) – в «спицах», одна (7) – соосно оси основной цилиндрической поверхности. Опора обладает осевой и зеркальной симметрией.

С помощью генетического алгоритма оптимизации находились геометрические параметры моделей ДО, при которых расчётное значение коэффициента отражения моделей не превышало значения минус 33 дБ в диапазоне 0–67 ГГц, а частота возникновения первой высшей гармоники была выше 68 ГГц.

Оптимизация проводилась для моделей ДО со значениями относительной диэлектрической прони-

цаемостью 2,5 и 2,9, которые соответствуют материалам Ultem PEI 1000 и Rexolite 1422. Частотные зависимости S-параметров оптимизированных моделей представлены на рис. 3.

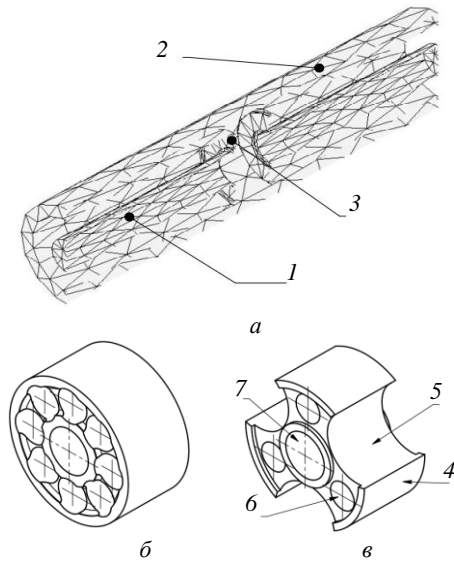


Рис. 2. ЭМ-модели: а – коаксиального волновода 1,85/0,804 мм, б и в – O- и Y-образные ДО соответственно: 1 и 2 – внешняя и внутренняя проводящая поверхности волновода, 3 – ДО, 4 и 5 – основная и усечённые поверхности Y-образной ДО, 6 и 7 – согласующие и крепёжные отверстия

В диапазоне частот от 0 до 75 ГГц амплитуда коэффициентов отражения всех оптимизированных моделей ДО не превысила минус 30 дБ. При этом частоты возникновения первой высшей моды, соответствующие резонансу на её передаточной характеристике (показаны стрелкой на графиках) для O- и Y-образной ДО, составила ~67,8 и ~69,8 ГГц соответственно.

Более подробно связь между передаточными характеристиками основной и первой высшей модами описаны в [13–15].

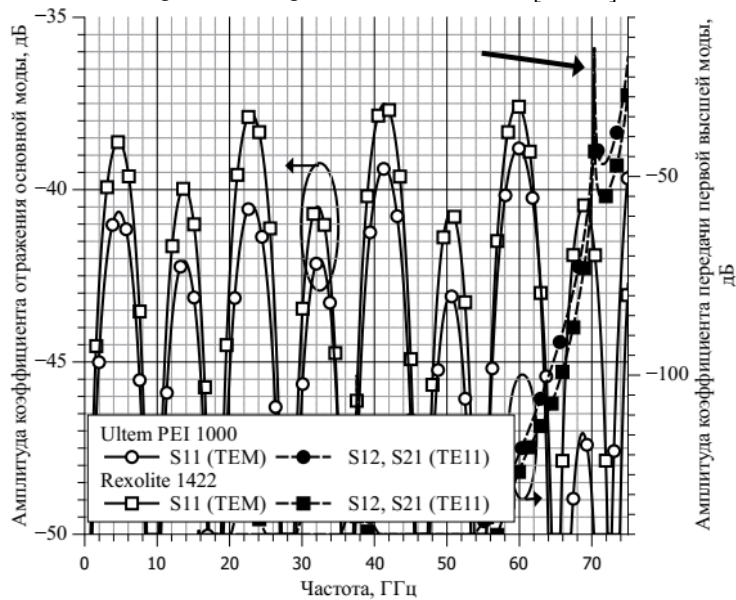


Рис. 3 (начало)

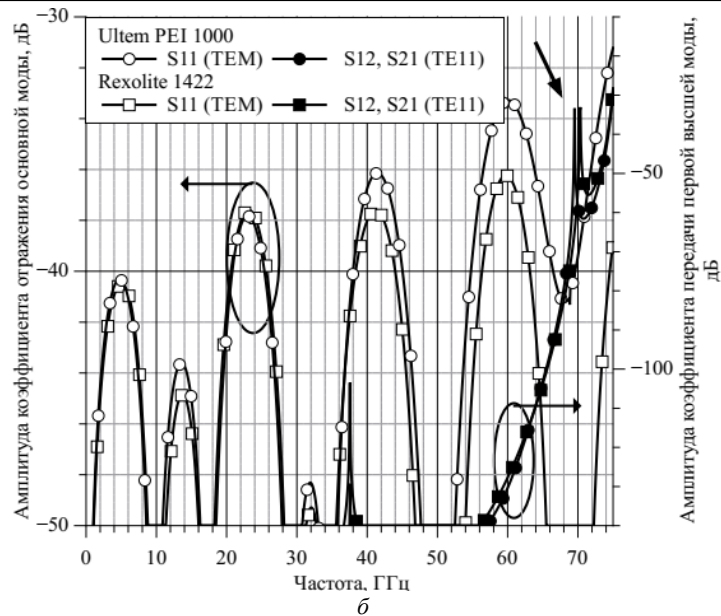


Рис. 3 (окончание). Частотные зависимости амплитуд коэффициентов отражения и передачи TEM- и TE11-мод соответственно оптимизированных моделей: а – с О-образной ДО; б – с Y-образной ДО

Прочностное моделирование

Механическая прочность наравне с электродинамическими параметрами является важной эксплуатационной характеристикой коаксиальных соединителей, которая в значительной мере определяется прочностью применяемых в них ДО. В инженерной практике для оценки прочности различных конструкций широко применяются САПР, которые на основе базовых прочностных параметров материалов рассчитывают механические напряжения, возникающие в моделях деталей из этих материалов при воздействии на них различных сил. При этом рассчитанные значения механического напряжения, возникающего в модели детали, используются для оценки её прочности по различным критериям.

Для оценки прочности ДО использовался критерий Мизеса, согласно которому пластическая (необратимая) деформация начинается, когда энергия изменения формы в какой-либо точке материала достигает критического значения, соответствующего пределу текучести при однослойном растяжении. Также использовался коэффициент запаса прочности на его основе, который является отношением предела текучести материала к максимальному напряжению по Мизесу, показывающий, насколько далеко материал находится от перехода в пластическую деформацию (насколько больше это отношение единицы).

Механические повреждения ДО связаны с взаимным силовым воздействием центральных проводников сочленяемых коаксиальных соединителей, которое может возникать в них при наличии в последних несоосности центральных и внешних проводников, а также при выступании их центральных проводников относительно опорной плоскости.

Для оценки прочности вышеописанных ДО был проведён численный расчёт максимальных механических напряжений, возникающих в их твердотельных моделях. При этом моделируемые силы имитировали радиальное воздействие, оказываемое на центральный проводник коаксиальных соединителей с воздушным

диэлектриком в процессе их эксплуатации. В качестве основных механических параметров, используемых в расчётах, применялись предел текучести и модуль Юнга, которые для материала Ultem PEI 1000 ГПа соответственно равны 110 МПа и 3,51 ГПа, а для материала Rexolite 1422 – также соответственно равны 75,8 МПа и 1,37 ГПа.

На рис. 4, а показана расчетная модель, состоящая из ДО 1 с жестко закреплённой внешней поверхностью 2 и установленной в ней цилиндрической консоли 3, имитирующей центральный проводник соединителя длиной 8 мм, запрессованный в ДО. На рис. 4, б и в показаны угловые направления α и β действия радиальной силы F величиной 0,5 Н, действующей перпендикулярно на ось консоли, закреплённой в О- и Y-образной ДО соответственно. При этом в силу радиальной симметрии ДО диапазон углов α и β ограничен 45° и 120° соответственно.

Зависимости расчётных значений максимальных механических напряжений, возникающих в моделях О- и Y-образных ДО от углов α или β , под которыми сила F действует на ось консоли, представлены на рис. 5.

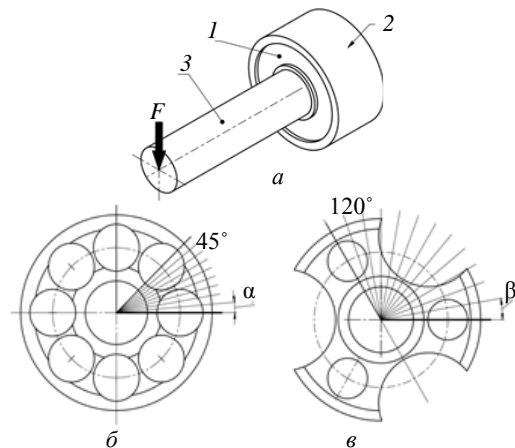


Рис. 4. Механическая модель: 1 – ДО, 2 – внешняя поверхность, 3 – цилиндрическая консоль

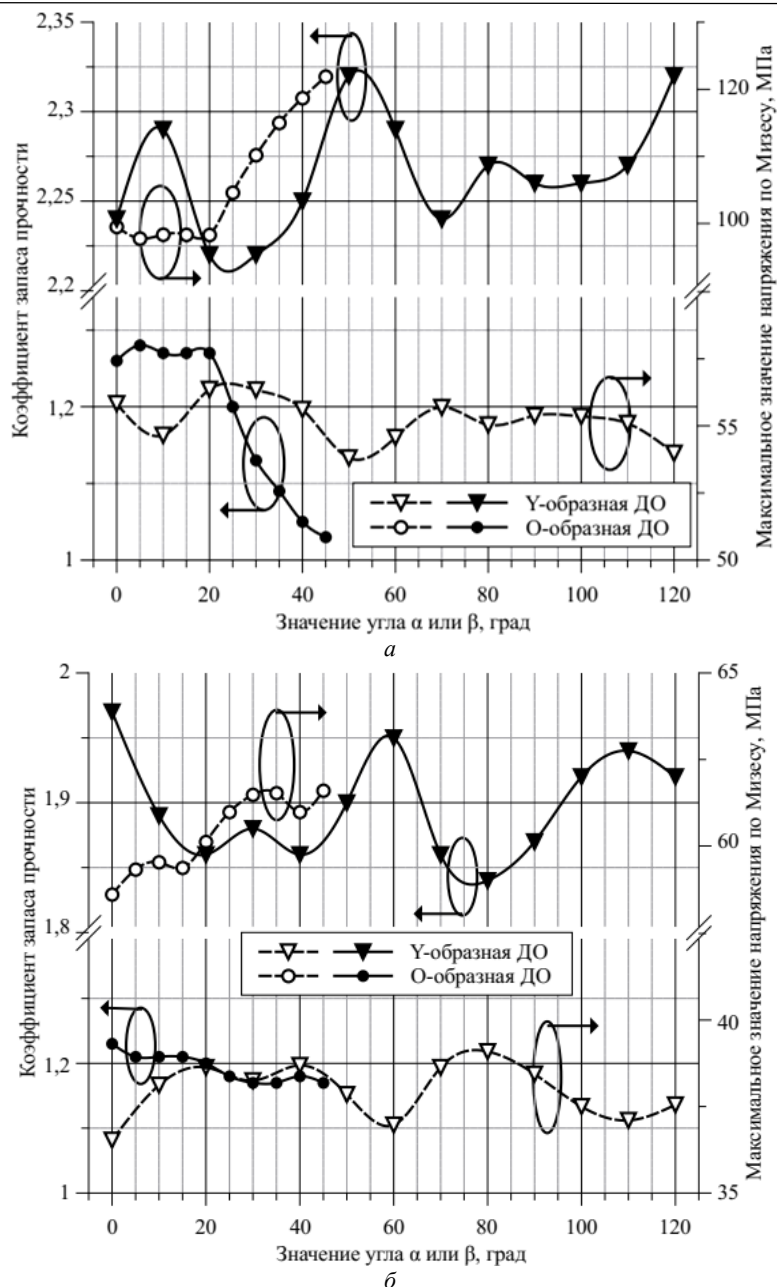


Рис. 5. Угловые зависимости максимального напряжения и коэффициента запаса прочности моделей ДО из материала: *a* – Ultem PEI 1000; *б* – REXOLITE 1422

По графикам на рис. 5, *a* видно, что значения максимальных напряжений, возникающих в O- и Y-образных моделях ДО из материала Ultem PEI 1000, колеблются в пределах от 53 до 57 и от 98 до 122 МПа соответственно, а минимальные значения коэффициента запаса прочности составляют 1,03 и 2,2 также соответственно.

Из графика на рис. 5, *б* видно, что значения максимальных напряжений, возникающих в O- и Y-образных моделях ДО из материала REXOLITE 1422, колеблются в пределах от 58 до 62 и от 36 до 39 МПа соответственно, а минимальные значения коэффициента запаса прочности составляют 1,17 и 1,8 также соответственно.

Численный расчёт показал, что прочность моделей Y-образных ДО из обоих моделируемых материалов Ultem PEI 1000 и REXOLITE 1422 соответственно превос-

ходит прочность O-образных моделей ДО в 1,5 и 2 раза. Вероятно, это связано с тем, что основные механические напряжения концентрируются в спицах ДО, которые в O-образных моделях значительно тоньше.

На рис. 6, *a* и *б* представлены твердотельные модели O- и Y-образной ДО соответственно с распределёнными в них механическими напряжениями.

Макетирование

Геометрические параметры O- и Y-образных ДО, полученные в процессе ЭМ-моделирования, легли в основу макетных образцов ДО. Для надёжной фиксации ДО в КК её внешний диаметр рассчитывался несколько больше диаметра внешнего проводника волновода, а диаметр центрального отверстия – несколько меньше диаметра центрального проводника волновода. Так, при размере сечения коаксиального волновода, равного 1,85/0,804 мм, макетные опоры имеют

следующие габаритные размеры внешнего и внутреннего диаметров – 1,9 и 0,55 мм соответственно и высоту – 1,2 мм (рис. 7).

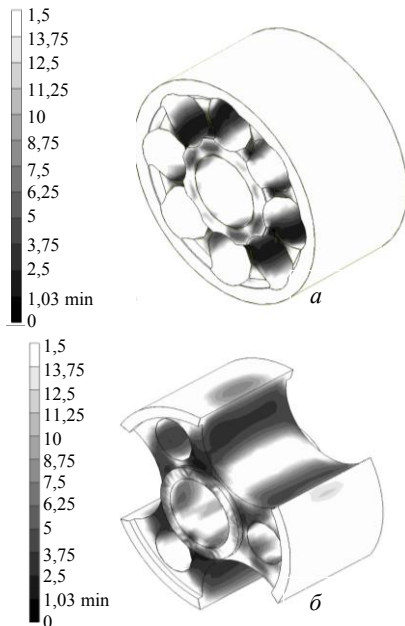


Рис. 6. Распределение механических напряжений в а – О- и б – Y-образной ДО



Рис. 7. Фото макетных образцов ДО:
1 и 3 – Ultem PEI 1000, 2 и 4 – Rexolite 1422

В качестве измерительного макета использовался одноканальный коаксиальный переход (рис. 8), серийная диэлектрическая опора которого заменялась на макетную. Измерение макета проводилось на двухпортовом векторном анализаторе цепей Keysight N5227B с использованием калибровочного набора Keysight 85056A.



Рис. 8. Измерительный макет на основе одноканального коаксиального перехода с сечением 1,85/0,804 мм

На рис. 9 представлены S-параметры измерительного макета с О- и Y-образными ДО соответственно.

Из графика на рис. 9, а видно, что в диапазоне частот от 0 до 67 ГГц амплитуда коэффициентов отражения измерительного перехода на основе О-образных ДО с диэлектрической проницаемостью 2,5 и 2,9 не превысила значений –24 и –26 дБ соответственно, а амплитуда коэффициентов передачи составила не более –0,3 и –0,25 дБ. При этом на верхней границе частотного диапазона характеристик стоит отметить наличие резких провалов (более выражены на передаточных кривых – показы стрелками), которые предположительно являются следствием наличия первой высшей моды колебания в коаксиальном переходе.

На рис. 9, б видно, что в этом же диапазоне амплитуда коэффициентов отражения перехода с Y-образными ДО из этих же материалов не превысила –22 и –25 дБ соответственно, а значение амплитуды коэффициентов передачи составило не более –0,2 и –0,25 дБ также соответственно.

Заключение

Численные расчёты показывают, что представленные О-образные ДО из материалов с относительной диэлектрической проницаемостью выше 2,9 не обеспечивают регламентируемую стандартами частоту среза для коаксиального волновода выше 67 ГГц, поскольку для его обеспечения при сохранении согласования ДО с КК (амплитуда коэффициента отражения не более минус 30 дБ) требуется увеличивать количество и/или размер согласующих внеосевых отверстий, тем самым излишне уменьшая механическую прочность ДО.

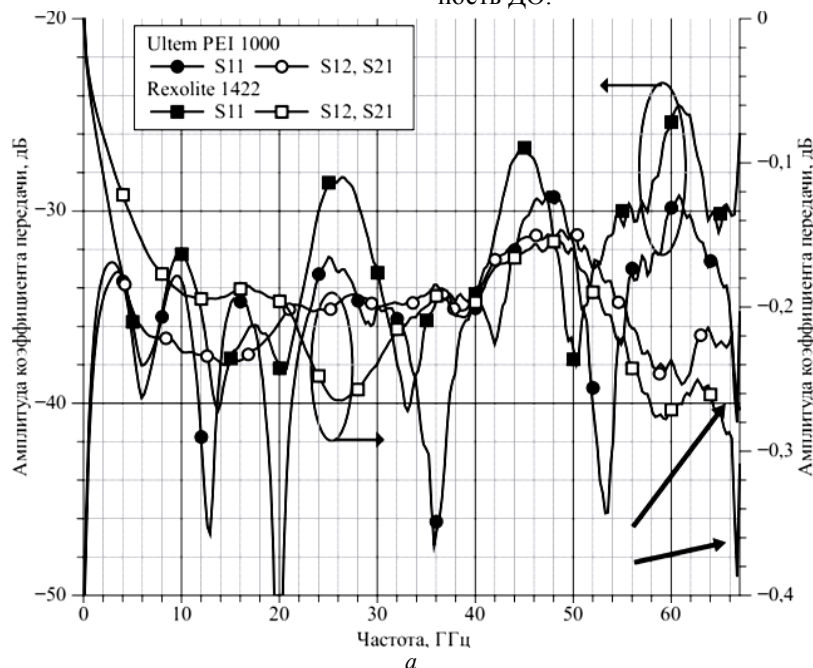


Рис. 9 (начало)

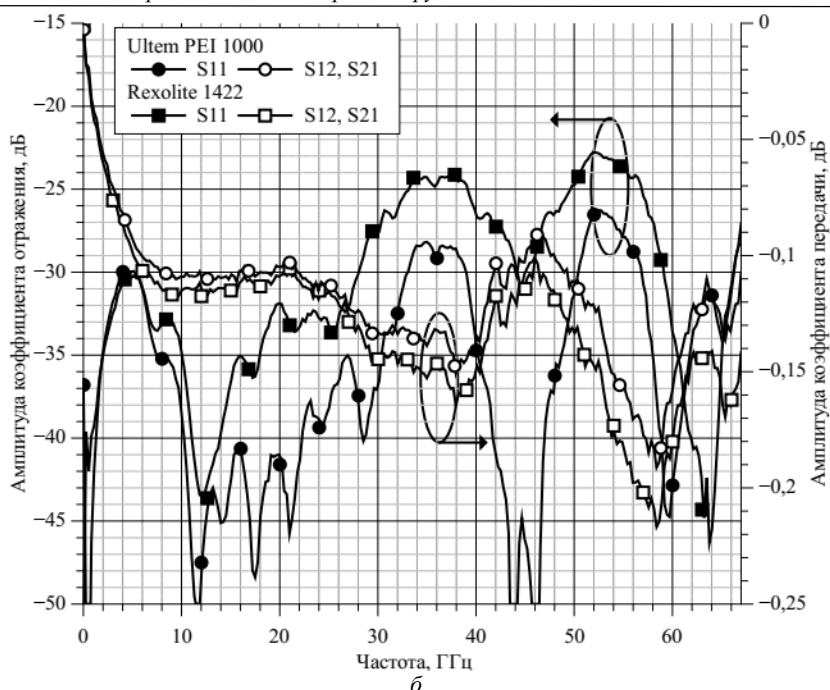


Рис. 9 (окончание). S-параметры измерительного макета: а – с О-образной ДО; б – Y-образными ДО

Для решения проблемы были изготовлены Y-образные ДО [16] с сопоставимым уровнем согласования и большей механической прочностью. Численный расчёт показал, что коэффициент запаса прочности Y-образных моделей больше O-образных в 2 и 1,5 раза соответственно материалов Ultem PEI 1000 и Rexolite 1422. Кроме того, Y-образная геометрия ДО «обладает» меньшим значением эффективной диэлектрической проницаемости по сравнению с O-образной, что потенциально позволяет с её помощью расширить используемый частотный диапазон воздушных коаксиальных волноводов сечением 1,85/0,804 мм приблизительно до 69 ГГц.

Физическая проверка работоспособности Y-образных ДО осуществлялась с помощью одноканального коаксиального перехода сечением 1,84/0,804 мм, в который устанавливались опытные образцы ДО. Измеренные значения коэффициентов отражения и передачи перехода с ДО из Rexolite 1422 не превысили значений -22 и $-0,25$ дБ соответственно, а для перехода с ДО из Ultem PEI 1000 они не превысили значений -25 и $-0,25$ дБ также соответственно.

Критические частоты в обоих случаях находились за пределом верхней границы рабочего диапазона векторного анализатора цепей и макетного коаксиального перехода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, проект FTWM-2023-0014 от 16.01.2023. Кроме того, автор выражает признательность д.т.н. Н.Д. Малютину за помощь в написании статьи.

Литература

1. Исследование способов увеличения направленности симметричных направленных ответвителей диапазона 2–20 ГГц / Г.Г. Гошин, А.В. Зорин, С.А. Подлиннов, А.Ю. Попков, А.В. Фатеев // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 5–7.

2. Пат. 124059 РФ, МПК Н 01 R 13/646. Диэлектрическая шайба / О.Ю. Морозов (РФ), Ф.А. Михеев (РФ), С.В. Павлов (РФ). – № 2 012 127 060 / 07; заявл. 27.06.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 9 с.

3. Пат. 2 597 868 РФ, МПК Н 01 В 11/18, Н 01 R 13/646. Пылезащитная диэлектрическая шайба / О.Ю. Морозов (РФ), В.П. Семибратов (РФ), С.А. Заостровных (РФ). – № 2 015 118 491 / 07; заявл. 18.05.2015; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26. – 9 с.

4. Пат. 4 867 703 США, МПК Н 01 R 24/542. High temperature dielectric bead for coaxial connector / J.R. Flanagan (США), D.J Critell (США) № 233 152; заявл. 17.08.1988; опубл. 19.09.1989. – 7 с.

5. Корнев А.В. Результаты применения материала Арфлон AR200 для изготовления СВЧ-устройств // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: матер. VIII рег. конф. – Томск: ТУСУР, 2019. – Ч. 2. – С. 546–548.

6. Khoroshilov E.V. S-parameters of coaxial adapters with dielectric beads made of «Rimamid» / E.V. Khoroshilov, N.D. Malyutin // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 66, No. 12. – P. 1328–1333.

7. Джуринский К.В. СВЧ-соединители мм-диапазона. Материалы для опорных диэлектрических шайб // СВЧ-электроника. – 2020. – Вып. 5. – С. 100–111.

8. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. – М.: Сов. радио, 1956. – 664 с.

9. Мительман Ю.Е. Электродинамика многослойных цилиндрических направляющих систем / Ю.Е. Мительман, С.Н. Шабунин. – Изд-во LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 155 с.

10. Малютин Г.А. Оптимизация алгоритма расчета плосковых структур методом сеток // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Томск: В-Спектр, 2021. – Т. 1. – С. 100–103.

11. Алексейчик Л.В. Решение комплексных мультифизических задач с помощью современных САПР СВЧ / Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин // Информатизация инженерного образования: матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2022. – С. 50–55.

12. Васильев Е.П. Современные САПР СВЧ и их особенности / Е.П. Васильев, И.А. Ермолаев, И.М. Сомов // Современные технологии в науке и образовании (СТНО–2019): сб. трудов II Междунар. науч.-техн. форума / под общ. ред.

О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – Т. 6. – С. 170–177.

13. Хорошилов Е.В. Уточнение расчёта граничных частот круглых коаксиальных волноводов / Е.В. Хорошилов, Н.Д. Малютин // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: матер. 30-й науч.-практ. конф., 2024 г. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2024. – 191 с.

14. Fuks R. New dielectric bead for millimeter-wave coaxial components // *Microwave journal*. – 2001 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/3205-new-dielectric-bead-for-millimeter-wave-coaxial-components> (дата обращения: 12.03.2025).

15. Clupper T. Cut-off frequency prediction for MMW coaxial interconnects / T. Clupper, Ch. Blair, J. Broomall // EDI CON online – 2019 [Электронный ресурс]. – URL: https://edicononline.com/wp-content/uploads/sites/6/2019/10/7_Cut-off-frequency-prediction-for-MMW-coaxial-interconnects-2.pdf (дата обращения: 12.03.2025).

16. Пат. 213299 РФ, МПК Н 01 R 13/646, Н 01 R 9/05, Н 01 R 24/44. Сверхширокополосная диэлектрическая шайба / Е.А. Сердюк (РФ), Е.В. Хорошилов (РФ), С.В. Павлов (РФ), В.В. Щуров (РФ), Ф.А. Михеев (РФ), В.Г. Круглов (РФ), А.Р. Галилуллин (РФ). – № 2 022 116 767; заявл. 22.06.2022; опубл. 05.09.2022, Бюл. № 25. – 7 с.

Хорошилов Евгений Владимирович

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0009-0001-3363-4323
Тел.: +7-952-885-65-29
Эл. почта: 230191@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.03.2025.

Принята к публикации: 25.04.2025.

Khoroshilov E.V.

Y-shaped dielectric microwave bead for circular coaxial waveguides

The paper presents the results of electromagnetic and mechanical numerical calculations and experimental prototyping of Y- and O-shaped dielectric microwave beads made from the Rexolite 1422 and Ultem PEI 1000. The beads are designed to be used in 1.85/0.804 mm air circular coaxial connectors with an operating frequency range of 0 to 67 GHz.

Keywords: dielectric bead, dielectric microwave hub, coaxial connector, cut-off frequency.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-1-52-58

References

- Goshin G.G., Zorin A.V., Podlinov S.A., Popkov A.Y., Fateev A.V., Issledovaniye sposobov uvelicheniya napravlenosti simmetrichnikh napravlennikh otvetvitelei diapazona 2–20 GHz [Investigate ways to improve the directionality of symmetric directional taps operating at 2–20 GHz]. *Proceeding of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no 3, pp. 5–7 (in Russ.)
- Morozov O.Y., Mikheev Ph.A., Pavlov C.V. *Dielektricheskaya shaiba* [Dielectric bead]. Patent RF, no. 124059, 2013.
- Morozov O.Y., Semibratov V.P., Zaostrovnikh S.A. *Pilezashitnaya dielektricheskaya shaiba* [Dust-proof dielectric bead]. Patent RF, no. 2597868, 2016.
- Flanagan J.R., Critell D.J. High temperature dielectric bead for coaxial connector, Patent USA, no. 4867703, 1988.
- Korneev A.V. *Rezultati primeneniya materiala Arphlon AR200 dlya izgotovleniya SVCH ustroystv* [Results of using

Arflon AR200 to manufacture microwave devices], *Proceedings of the 8th All-Russian Scientific Conference «Science and Practice: Project Activities – from Idea to Implementation»*, Tomsk, TUSUR Publ., 2019, part 2, pp. 20–23 (in Russ.).

6. Khoroshilov E.V., Malyutin N.D. S-parameters of coaxial adapters with dielectric beads made of «Rimamid», *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 66, no 12, pp. 1328–1333.

7. Djurinskiy K.V. [A microwave mm-band connectors. Materials for dielectric beads]. *SDS-electronics*, 2020, no. 5, pp. 100–111 (in Russ.).

8. Gol'dshtein L.D., Zernov N.V. *Electromagnitnye polya i volni* [Electromagnetic fields and waves]. M., Sov. radio, 1956, 664 p.

9. Mitelman Yu.E., Shabunin C.N. *Electrodinamika mnogosloinikh tsilindricheskikh napravlyayushih sistem* [Electrodynamics of multilayers cylindrical systems]. LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 155 p.

10. Malyutin G.A. [Optimization of the algorithm for calculating strip structures by the grid method]. *Electronic Devices and Control Systems. Materials of the International Scientific and Practical Conference*, 2021, vol. 1, pp. 100–103 (in Russ.).

11. Alekseychik L.V., Kurushin A.A. Resheniye kompleksnikh multifizicheskikh zadach s pomoshyu sovremenikh CAPR SVCH [Solving complex multiphysics problems using modern microwave CAD systems]. *Proceedings of the 7th Internationalization and Engineering Education International Conference*, M., 2022, pp. 50–55 (in Russ.).

12. Vasiliev E.P., Ermolaev I.A., Somov I.M. Sovremenie SAPR i ih osobenosti [Modern microwave CAD-system and their peculiarities]. In collection: *Modern Technologies in Science and Education (STNO–2019)*. *Proceedings of the II International Scientific and Technical Forum*. Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University, 2019, vol. 10, pp. 174–181 (in Russ.).

13. Khoroshilov E.V., Malyutin N.D. *Utochneniye raschyota granichnykh chastot coaxialnikh volnovodov* [Refinement of the cut-off frequencies calculation of circular coaxial waveguides] *Prirodnye i intelektualnyye resursy Sibiri: doklady tridchatoi mejdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Natural and intellectual resources of Siberia: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference]*. Tomsk, TUSUR Publ., 2024, 191p (in Russ.).

14. Fuks R. New dielectric bead for millimeter-wave coaxial components. *Microwave Journal*, 2001, Available at: <https://www.microwavejournal.com/articles/3205-new-dielectric-bead-for-millimeter-wave-coaxial-components> (Accessed: March 01, 2025).

15. Clupper T., Blair Ch., Broomall J. Cut-off frequency prediction for MMW coaxial interconnects, EDI CON online, 2019, Available at: https://edicononline.com/wp-content/uploads/sites/6/2019/10/7_Cut-off-frequency-prediction-for-MMW-coaxial-interconnects-2.pdf (Accessed: March 01, 2025).

16. Serdyuk E.A., Khoroshilov E.V., Pavlov C.V., Shyurov V.V., Mikheev Ph.A., Khoroshilov E.V., Galimillin A.R. *Sverkhshirokopolosnaya dielektricheskaya shaiba* [Ultra-wideband dielectric bead]. Patent RF, no. 213229, 2022.

Evgenii V. Khoroshilov

Postgraduate student, Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems (KUDR), Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0001-3363-4323
Phone: +7-952-885-65-29
Email: 230191@mail.ru

Received: 18.03.2025.

Accepted: 25.04.2025.