

## Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости

*И.П. Молостов<sup>1,2</sup>, В.В. Щербинин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук (Красноярск, Россия)

## Coaxial Measuring Cell for Wideband Permittivity Measurements

*I.P. Molostov<sup>1,2</sup>, V.V. Scherbinin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> L.V. Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)

Рассмотрено несколько вариантов конструкции коаксиальных ячеек, рассчитанных на работу в линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом и предназначенных для измерения комплексной диэлектрической проницаемости дисперсных и жидких материалов в диапазоне частот от 0.01 до 16 ГГц. Проведено численное моделирование коаксиальных ячеек с использованием метода конечных разностей во временной области. Проанализировано распространение TEM-волны через ячейки и рассчитаны их S-параметры. Выполнен сравнительный анализ рассмотренных ячеек и сделаны выводы о возможности их использования для проведения точных измерений комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 0.01 до 16 ГГц. Рассмотрены особенности различных вариантов конструкции коаксиальной ячейки с точки зрения технической реализации. Приведены экспериментальные результаты коэффициента стоячей волны напряжения для одного из вариантов предлагаемых конструкций. Наблюдается хорошее согласование экспериментальных данных с результатами численного моделирования в диапазоне частот 0.01–12 ГГц. Расхождение модельных и экспериментальных данных в диапазоне частот 12–16 ГГц можно объяснить погрешностями в геометрии ячейки и конечной проводимостью используемых проводников.

**Ключевые слова:** коаксиальный волновод, диэлектрическая проницаемость, КСВН, измерительная ячейка.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-09

**Введение.** Методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) дисперсных и жидких материалов, основанные на изме-

Some variants of coaxial measuring cells for 50 Ohm line and complex permittivity measurements of liquid and disperse matters in 0.01–16 GHz frequency band has been considered. Numerical modeling using finite difference method in time domain has been carried out. TEM-wave propagation through cells has been analyzed and S-parameters were calculated. Comparative analysis of considered cells has been carried out. Conclusions about its application to complex permittivity measurement in frequency band 0.01–16 GHz has been formulated. Technical features of arbitrary variants have been considered. Experimental results of the voltage standing wave ratio for one of the variants of the proposed designs have been presented. Good agreement between the experimental data and the results of numerical modeling in a frequency band 0.01–12 GHz is observed. The disagreement between the model and experimental data in the frequency band 12–16 GHz can be explained by the errors in the cell geometry and the finite conductivity of the conductors.

**Key words:** coaxial waveguide, permittivity measurement, VSWR, measuring cell.

рения коэффициентов отражения и прохождения отрезка коаксиальной линии, отличаются большой широкополосностью и сравнительной просто-

той обработки результатов измерений. Малое количество исследуемого вещества, необходимое для измерений, возможность измерения КДП образцов как с низкими, так и с высокими значениями диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, а также возможность термостатирования образцов для измерения температурной зависимости КДП делают эти методы доступными и удобными для лабораторных исследований различных веществ [1].

Преимущества данных методов обусловили их широкое применение в диэлькометрии, что отражено, в частности, в исследованиях [2–4]. Во всех этих работах применялись близкие друг к другу схемы экспериментальных установок. Основную их часть составляет коаксиальная ячейка — отрезок коаксиальной линии, заполненный исследуемым веществом и подключенный с помощью согласующих переходных устройств к векторному анализатору цепей или другому измерительному прибору. Для удержания образца в заданном объеме используются центрирующие шайбы, изготовленные из химически инертного материала с низким значением диэлектрической проницаемости. Обычно для этих целей используется тефлон (политетрафторэтилен), имеющий диэлектрическую проницаемость около 2.1, весьма слабо меняющуюся при изменении частоты и температуры. Еще одним важным достоинством этого материала являются крайне низкие диэлектрические потери.

Включение диэлектрических шайб в коаксиальную ячейку приводит к уменьшению волнового сопротивления участков, занимаемых ими. Данное изменение пропорционально корню из диэлектрической проницаемости используемого материала и, как следствие, к рассогласованию волноводного тракта. Это необходимо учитывать при обработке результатов измерений. В работах [2–4] предусмотрен учет влияния шайб на результаты измерения КДП исследуемого образца, однако, несмотря на это, их использование нежелательно, поскольку из-за рассогласования тракта сужается диапазон измерений КДП.

В данной работе численно рассмотрено несколько вариантов конструкции коаксиальных ячеек, рассчитанных на работу в линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом.

**1. Метод численного моделирования.** Для численного моделирования рассматриваемых линий передачи применялся метод конечных разностей во временной области [5]. Он основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме. Согласно этому методу, непрерывное пространство заменяется дискретной сеткой и рассматриваются значения электромагнитных полей в узлах этой сетки. Частные производные в уравнениях Максвелла

заменяются конечными разностями, и производится итерационное вычисление значения поля на каждом из узлов выбранной сетки. Таким образом, удается рассчитать поле в заданной точке пространства в произвольный момент времени.

Расчеты производились с помощью trial-версии пакета CST Microwave Studio. Исследуемая линия передачи возбуждалась на одном из концов ТЕМ-волной основного типа. С помощью программного обеспечения рассчитывалось распространение волны вдоль линии и вычислялись комплексные коэффициенты прохождения и отражения. Аналогичная операция проводилась для противоположного конца линии. В результате можно получить полную матрицу S-параметров участка линии. Связь S-параметров с коэффициентом стоячей волны напряжения (КСВН) описывается следующим выражением:

$$K_n = \frac{1 + |S_{nn}|}{1 - |S_{nn}|}, \quad (1)$$

где  $|S_{nn}|$  — модуль комплексного коэффициента отражения от порта n. В случае идеального согласования участков линии передачи КСВН должен быть равен 1. По близости рассчитанного КСВН к единице можно судить о качестве согласования участков линии передачи.

**2. Моделирование стыка коаксиальных волноводов с различным заполнением.** На рисунке 1 изображен стык двух коаксиальных линий передачи с различными диэлектрическими заполнениями. Для их согласования друг с другом необходимо добиться равенства их волновых сопротивлений. Волновое сопротивление коаксиального волновода вычисляется по следующей формуле [6]:

$$Z = 60 \ln(D/d)/\sqrt{\epsilon}, \quad (2)$$

где  $D$  — диаметр оболочки линии;  $d$  — диаметр внутреннего проводника;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость заполнения.

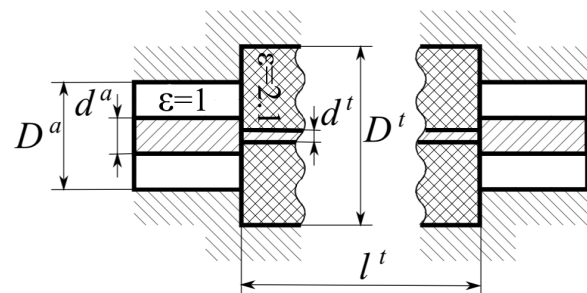


Рис. 1. Соединение двух коаксиальных волноводов с различными изолирующими материалами

Участок линии с центрирующей шайбой можно рассматривать как волновод с диэлектрическим заполнением, состыкованный с волноводом, заполненным воздухом. При моделировании участка линии передачи, имеющего воздушное заполнение, были выбраны значения диаметров оболочки и внутреннего проводника предусмотренные стандартом ГОСТ 13317-89, а именно  $D^a = 7$  мм,  $d^a = 3.04$  мм. Волновое сопротивление этого участка равно 50 Ом. Для участка линии передачи, имеющего заполнение, согласования можно было добиться только путем изменения диаметров внешнего и внутреннего проводников. Подставляя в формулу (2) значения  $Z = 50$  и  $\epsilon = 2.1$ , можно получить выражение, связывающее диаметры внешнего  $D^t$  и внутреннего  $d^t$  проводника волновода, заполненного диэлектриком:

$$D^t = d^t \exp(50\sqrt{2.1}/60). \quad (3)$$

Не все варианты соотношения диаметров проводников, удовлетворяющие формуле (3), приведут к одинаково хорошему согласованию линии передачи. Даже при совпадении волновых сопротивлений, наличие перехода с одного диаметра проводника на другой представляет собой неоднородность и приводит к появлению отражения от стыка секций с разными диаметрами, и к нарушению одномодового режима возбуждения линии [7]. В связи с этим встает задача оптимального выбора значений  $D^t$  и  $d^t$ , при которых минимизируются описанные выше эффекты.

Было рассмотрено четыре варианта конфигурации участка линии с диэлектрическим заполнением. Параметры  $D^t$  и  $d^t$  для каждой из конфигураций представлены в таблице 1. Три из них рассчитаны на волновое сопротивление 50 Ом. Волновое сопротивление четвертого варианта с несогласованной центрирующей шайбой равно 34.5 Ом. Отдельно исследовано влияние длины шайбы  $l^t$  на величину КСВН. Обнаружено, что длина тефлоновой шайбы  $l^t$  незначительно влияет на согласование, поэтому в дальнейшем моделирование выполнялось при фиксированной длине. Ее значение было выбрано равным  $l^t = 4$  мм из соображений обеспечения, с одной стороны, достаточной механической прочности и, с другой стороны, минимизации общей длины измерительной ячейки.

Моделирование проводилось в диапазоне частот 0.01–16 ГГц. Хотя диапазон частот одномодового режима линии без заполнения составляет 0–18 ГГц, но при измерении материалов, имеющих диэлектрическую проницаемость больше чем 1.5, на участке линии, заполненном исследуемым материалом, критическая частота первой симметричной моды смещается на частоты ниже 16 ГГц. Так как большинство дисперсных материалов, а тем более жидкостей, имеют диэлектриче-

Таблица 1

Варианты конфигурации участка волновода с диэлектрическим заполнением

	$D^t$	$d^t$
Конфигурация 1	8.27	2.47
Конфигурация 2	10.18	3.04
Конфигурация 3	7	2.09
Конфигурация 4	7	3.04

скую проницаемость выше 1.5, рассмотрение диапазона частот 16–18 ГГц не имеет практического смысла. Для применения волноводных методов в диапазоне частот 0–0.01 ГГц требуется использование коаксиальных ячеек очень большой длины, что технически сложно, поэтому данный диапазон также был исключен из рассмотрения.

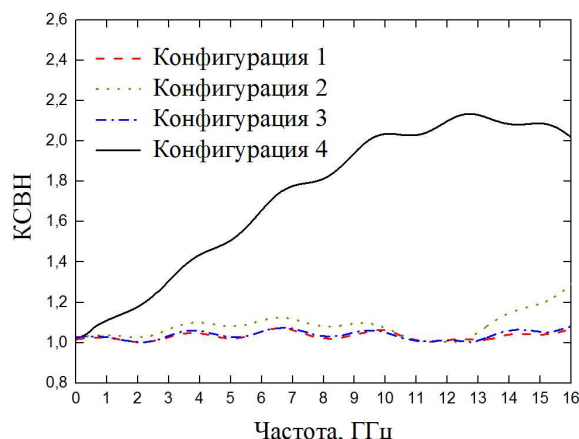


Рис. 2. Зависимости коэффициентов стоячей волны напряжения от частоты для перехода с воздушной линии на волновод с заполнением

На рисунке 2 представлены зависимости КСВН от частоты для различных конфигураций участка волновода с диэлектрическим заполнением. Видно, что для вариантов конфигурации 1 и 3 КСВН не превышает значения 1.08 во всей рассматриваемой полосе частот, что свидетельствует об очень хорошем согласовании. Для варианта конфигурации 2 наблюдаются более высокие значения КСВН (до 1.3) в рассматриваемой полосе частот. Это объясняется тем, что в данном случае на стыке участков происходит более резкое изменение диаметра оболочки  $D^t$ , чем в случаях 1 и 3. Это приводит к возникновению более существенной неоднородности в линии передачи, и как следствие, к худшему ее согласованию. Значение КСВН несогласованного стыка существенно выше и достигает 2.15.

**3. Анализ различных вариантов конструкции коаксиальных ячеек.** К конструкции коаксиальной измерительной ячейки предъявляется ряд требований.

Во-первых, ячейка должна иметь не менее двух центрирующих шайб, что обеспечивает удержание образца в заданном месте тракта. Во-вторых, одна из центрирующих шайб должна жестко фиксировать центральную жилу коаксиальной ячейки от продольного перемещения, поскольку необходимо обеспечить правильную геометрию соединительных разъемов. Проще всего этого добиться, используя шайбу, у которой меньший диаметр внутреннего проводника и больший диаметр оболочки, чем соответствующие диаметры участка волновода с воздушным заполнением. В-третьих, должна сохраняться возможность свободного извлечения второй шайбы. Это необходимо для того, чтобы обеспечить возможность загрузки исследуемого образца в коаксиальную ячейку.

Фиксацию центрального проводника линии от продольных перемещений обеспечивает шайба конфигурации 1. Эту конструкцию можно реализовать двумя способами: либо выполнить разъемный центральный проводник, что сложно ввиду его малого диаметра; либо выполнить разъемной или разрезной саму тefлоновую шайбу. Последний вариант проще в реализации, но в этом случае сложнее добиться герметичности шайбы, что требуется при измерении КДП жидких материалов. Герметичность можно обеспечить, если использовать одновременно вариант 2 и 3 конструкции шайб, расположив их последовательно вплотную друг к другу. Условию простоты извлечения шайбы лучше всего удовлетворяет вариант 4 и несколько хуже — вариант 2 (в этом случае необходимо делать разъемным корпус ячейки), но при этом вариант 4 не является согласованным с отрезком волновода, имеющим воздушное заполнение, и это необходимо учитывать при обработке результатов измерений.

На рисунке 3 представлены три варианта конструкции коаксиальных ячеек, в которых скомбинированы различные варианты шайб, обеспечивающих одновременное выполнение всех требований к ячейке. Ячейка, изображенная на рисунке 3а, имеет центрирующие шайбы конфигураций 1 и 4. Ячейка, изображенная на рисунке 3б, имеет шайбы конфигураций 1 и 2. Ячейка, изображенная на рисунке 3в, имеет три центрирующие шайбы: с одной стороны образец ограничен шайбой конфигурации 2, а с другой — парой шайб с конфигурациями 2 и 3. Ячейка конфигурации 3а используется при измерениях КДП образцов почвы в совместной лаборатории физических проблем мониторинга агросистем АлтГУ и Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН. Зависимо-

сти КСВН от частоты колебаний электромагнитного поля для этих коаксиальных ячеек представлены на рисунке 4.

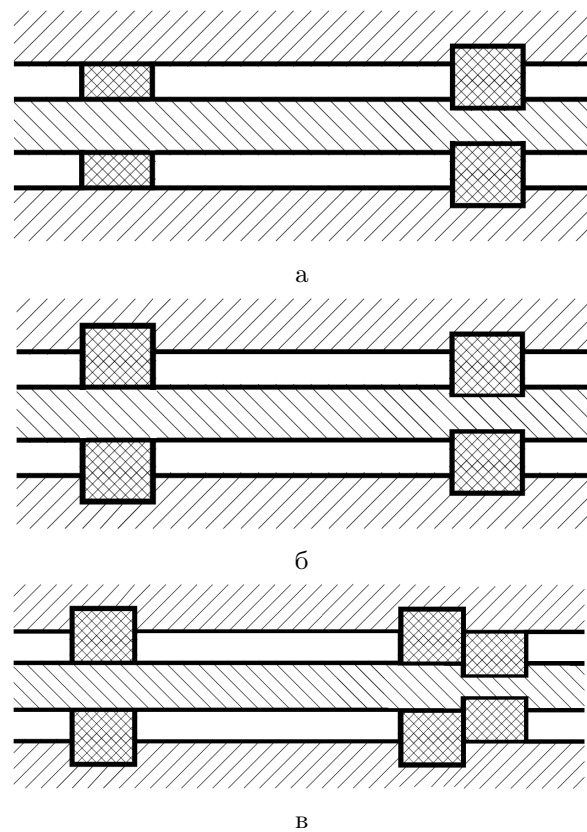


Рис. 3. Варианты конструкции коаксиальной ячейки

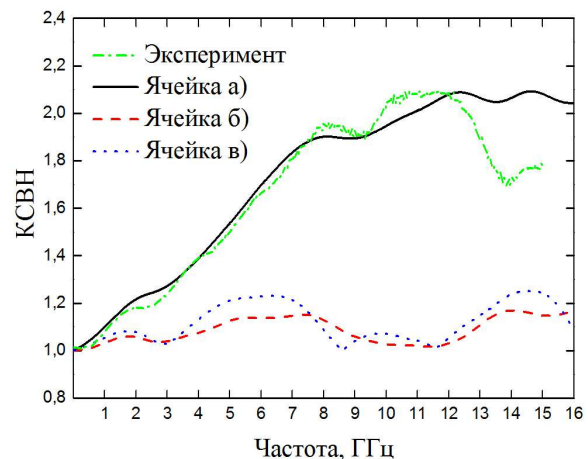


Рис. 4. Зависимости коэффициентов стоячей волны напряжения от частоты колебаний электромагнитного поля для коаксиальных ячеек различной конструкции

Как следует из рисунка 4, КСВН ячейки (а), имеющей в своем составе несогласованный отрезок линии, в рассматриваемой полосе частот достигает значения 2.1. Это значит, что порядка 11%

мощности отражается от несогласованной шайбы и свидетельствует о плохом согласовании коаксиальной ячейки с линией передачи, рассчитанной на волновое сопротивление 50 Ом. Экспериментально измеренный КСВН для данной ячейки изображен штрих-пунктирной линией. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей Agilent E5071C. Расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования на частотах выше 12 ГГц можно объяснить тем, что на высоких частотах становятся значимыми отклонения геометрии реальной ячейки от модельного представления и конечная проводимость используемых проводников. КСВН для вариантов конструкции (б) и (в) во всей рассматриваемой полосе частот не превышает значения 1.3. Отражение от тефлоновых шайб в данных случаях не превышает 2% по мощности. Все это говорит о хорошем согласовании ячеек (б) и (в) с линией передачи рассчитанной на волновое сопротивление 50 Ом. Вариант конструкции (б) обеспечивает более хорошее согласование по отношению к (в) в окрестности частот 6 ГГц и 14 ГГц. При этом для варианта конструкции (в) проще добиться герметичности объема, занима-

емого образцом. Если не планируется проведение измерений жидких материалов, то предпочтение стоит отдать варианту конструкции (б). В случае же если такие эксперименты планируются, то лучшим выбором будет (в).

**Заключение.** Предложено два варианта конструкции коаксиальных ячеек, рассчитанных на работу в линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом и предназначенных для проведения измерений комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 0.01–16 ГГц. Проведено численное моделирование этих ячеек с использованием метода конечных разностей во временной области. На основе данных численного моделирования обнаружено, что коэффициент стоячей волны напряжения предложенных ячеек не превышает значения 1.3, что свидетельствует о хорошем согласовании с пятидесятиомной линией передачи. С учетом особенностей технической реализации вариант конструкции, представленный на 3в, является более подходящим для измерения жидких материалов, хотя и обеспечивает несколько худшее согласование сравнительно с вариантом конструкции 3б.

### Библиографический список

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М., 1963.
2. Gorriti A.G., Slob E.C. Comparison of the different reconstruction techniques of permittivity from S-parameters // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. — 2005. — Vol. 43, № 9.
3. Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell // Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. — 1998. — Vol. 47, № 4.
4. Bois K.J., Handjojo L.F., Benally A.D. et al. Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials // Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. — 1999. — Vol. 48, № 6.
5. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media // Trans. Antennas Propagat., IEEE Transactions on. — 1966. — Vol. 14, № 2.
6. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. — М., 1989.
7. Кац Б.М., Мещанов В.П., Фельдштейн А.Л. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами. — М., 1984.