

Определение диэлектрической проницаемости материалов на бистатической установке

В.П. Крылов, Р.А. Чирков

ГНЦ АО “ОНПП ”Технология” им А.Г. Ромашина”, Обнинск, Россия

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность определения диэлектрической проницаемости материалов в свободном пространстве на бистатической установке по отраженной волне под углом Брюстера в широкой полосе частот с использованием векторного анализатора цепей. Описывается метод применения временной селекции, позволяющий повысить точность определения диэлектрической проницаемости в широкой полосе частот. Приводятся экспериментальные результаты частотных зависимостей диэлектрической проницаемости известных материалов на сверхвысоких частотах от 1 до 60 ГГц.

Ключевые слова: Диэлектрическая проницаемость, бистатическая установка, угол Брюстера.

1. Введение

Современные методы измерения в свободном пространстве все шире используют бистатические установки для реализации широкополосных измерений. Одной из возможностей такой реализации является применение эффекта Брюстера для определения диэлектрической проницаемости материалов в широкой полосе частот ($\varepsilon(f)$) по отраженной волне от пластины.

В алгоритме определения диэлектрической проницаемости из углового положения угла Брюстера:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}^2(\alpha_{\text{Бр}}), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала без потерь, $\alpha_{\text{Бр}}$ – угол падения волны на пластину, соответствующий углу Брюстера, отсутствуют зависимости от толщины пластины и измерительной частоты [1].

Корректное использование формулы (1) предполагает реализацию сверхширокополосного метода определения диэлектрической проницаемости.

2. Экспериментальная бистатическая установка

Экспериментальные измерения угловых зависимостей отраженной волны проводились на бистатической установке в полосе частот от 1 до 60 ГГц.

В центре установки располагалась пластина размером 400x500 мм. На расстоянии 700 мм от центра установки помещались линейно-поляризованные рупора: неподвижный передающий и приемный на вращающейся консоли вокруг пластины. Для измерения в установке использовался векторный анализатор цепей. Угловые датчики пластины и консоли с приемным рупором размещались на одной оси, что позволило реализовать точность позиционирования по углу $\Delta\alpha = 7''$. При измерении в начале выполнялся поворот пластины по абсолютному угловому датчику на угол α , а затем поворачивалась консоль с приемным рупором на угол $\beta = 2 \cdot \alpha$. В векторном анализаторе цепей для каждого угла α фиксировались и запоминались амплитуда и фаза параметра S_{21} для отраженной волны дискретно во всем заданном частотном диапазоне.

Калибровка установки начальных углов поворота пластины и приемного рупора

проводилась с помощью лазерного уровнемера.

3. Измерительная процедура

При использовании формулы (1) для измерения $\varepsilon(f)$ в свободном пространстве оказалось, что в эксперименте частотные положения минимума амплитуды отраженной волны зависят от электрической толщины пластины и измерительной частоты [1], что хорошо видно на рис. 1. Такие экспериментальные результаты не пригодны для практического применения, так как погрешность определения диэлектрической проницаемости материала в полосе частот составляла более 10%.

Для повышения точности определения $\varepsilon(f)$, предложено применить дополнительный метод обработки данных на стадии экспериментальных измерений в объеме процедур, реализуемых векторным анализатором цепей.



Рисунок 1 Расчетная и измеренная частотные зависимости диэлектрической проницаемости пластины из кварцевого стекла, полученные из анализа угловых зависимостей вблизи угла Брюстера.

Для отслеживания границ искажения сигнала отраженной волны внутри полигона во временной области вблизи пластины проведены измерения угловых зависимостей коэффициента отражения в полосе частот от 1 до 60 ГГц с применением временной селекции. На примере пластины кварцевого стекла толщиной $d=18,5$ мм оценим результаты измерения угловых зависимостей амплитуды коэффициента отражения в диапазоне углов падения $45^\circ \div 85^\circ$ при изменении временной селекции в диапазоне $47 \div 49$ нс, которые представлены на рис.2, где отчетливо видны отражения от обеих границ пластины (стрелки 1 и 2). Положение амплитуды коэффициента отражения, как видно из рисунка, соответствует постоянному значению на временной оси, а его величина плавно снижается к минимуму в области угла Брюстера $\alpha_{\text{Бр кв}} = 62,8732^\circ$. В левой части рисунка видно наклонное расположение гребня, отмеченного стрелкой 3, связанного с влиянием на амплитуду коэффициента отражения прямого просачивания сигнала из передающего рупора в приемный, величина амплитуды которого плавно увеличивается с ростом угла поворота приемного рупора, но не достигает угла Брюстера.

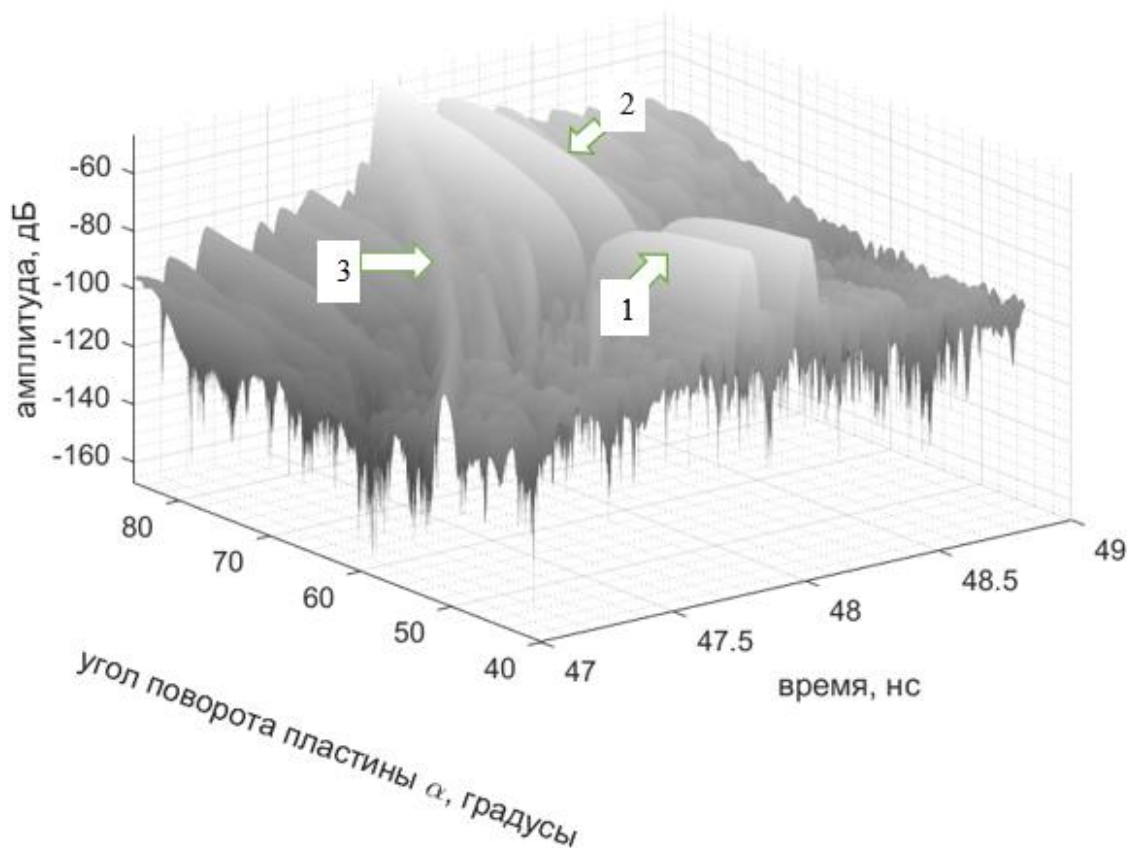


Рисунок 2 Временное распределение амплитуды отраженной волны при наклонном падении волны на пластину из кварцевого стекла. Стрелками 1 и 2 указаны вершины гребней, соответствующие границам пластины, а стрелка 3 указывает на вершину гребня волны между рупорами.

Из рисунка 2 видно, что, если применить временную селекцию, то можно устранить влияние перетекания сигнала из рупора в рупор ограничением ширины рабочего временного диапазона, включающего только положения пластины внутри полигона.

Что же касается влияния электрической толщины пластины на точность определения $\varepsilon(f)$ по формуле (1), то в работе [1] сделан вывод о невозможности устранения этого влияния традиционными способами, но подробное рассмотрение рисунка 2 показывает, что этот недостаток метода можно попытаться устранить выбором интервала временной селекции, включающего только первую границу пластины, которой соответствует вершина гребня 1. При этом, как показали исследования в работе [2], выбор ширины окна, соответствующего только первой границе, не устраняет выполнение условий эффекта Брюстера по формуле (1) в нулевой точке, но устраняет влияние на зависимость $\varepsilon(f)$ электрической толщины пластины.

В экспериментальной процедуре для установления положения окна временной селекции, соответствующего первой границе при использовании трансформированной функции временной селекции, применялось положение пластины, повернутой на угол $\alpha = 45^\circ$ и расположение приемного рупора перпендикулярно строительной оси передающей антенны. При этом выбор ширины окна в пределах $0.5 \div 10$ пс мало влиял на результаты измерений.

3. Экспериментальная проверка алгоритма

При проверке предлагаемого алгоритма использовали пластины из стеклокерамики сподуменового состава. Для определения $\epsilon(f)$ стеклокерамики в диапазоне 1÷60 ГГц измеряли две пластины размером 400x500 мм с различными толщинами, для которых, каждый раз перед началом измерений, определялся временной интервал, соответствующий положению первой границы пластины. Затем измерялись угловые зависимости амплитуды отраженной волны при наклонном падении волны на пластину в диапазоне углов от 67° до 70° с шагом $0,01^\circ$ на каждой из 12801 частот в диапазоне от 1 до 60 ГГц с использованием функции временной селекции векторного анализатора цепей. Из угловых зависимостей по минимуму амплитуды коэффициента отраженной волны для каждой частоты определялся угол, по которому, в соответствии с формулой Брюстера (1), определялась диэлектрическая проницаемость пластины. При этом при проверке алгоритма никакой дополнительной обработки измеренных данных не производилось.

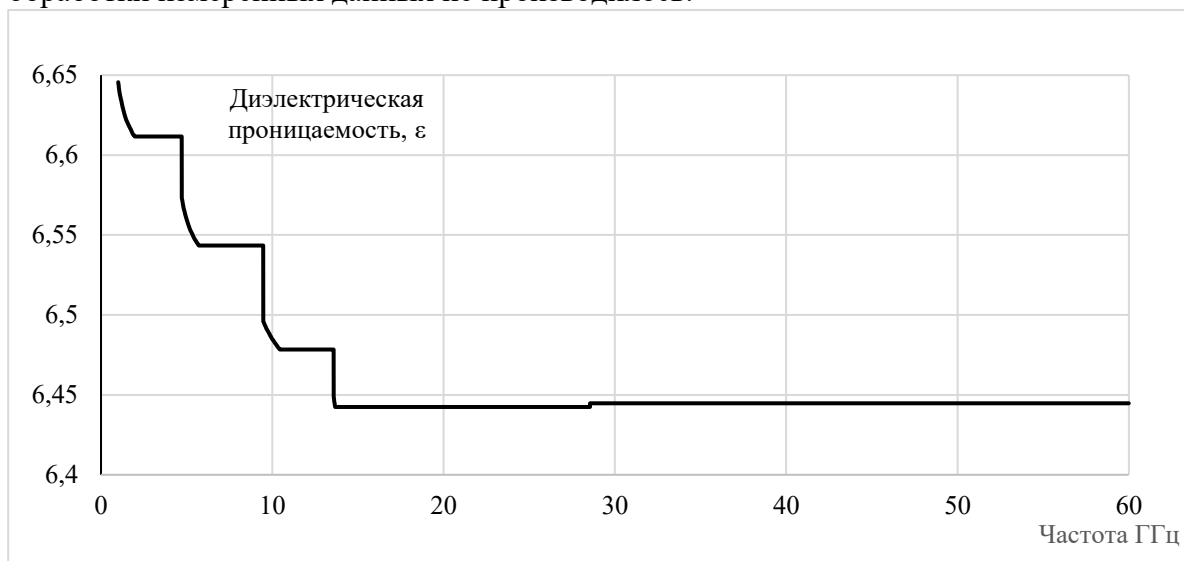


Рисунок 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости пластины из стеклокерамики сподуменового состава.

Результаты определения диэлектрической проницаемости $\epsilon(f)$ стеклокерамики сподуменового состава представлены на рисунке 3, для пластины с толщиной $d=10,0$ мм. Предварительно было проведено измерение диэлектрических проницаемостей образцов-дисков в цилиндрических резонаторах на частотах $F_1 = 10,0$ ГГц, $F_2 = 15,0$ ГГц, $F_3 = 19,0$ ГГц методом фиксированной частоты по ГОСТ Р 8.623-2015. В результате измерений в резонаторах получены следующие результаты $\epsilon_{F_1} = 6,49$; $\epsilon_{F_2} = 6,50$; $\epsilon_{F_3} = 6,53$. Из сравнения результатов измерений следует, что погрешность измерения по всему диапазону в свободном пространстве относительно измерений в резонаторе составляет $+1/-2\%$. Из анализа рисунка 3 видно, что наибольшие изменения $\epsilon(f)$ происходят в длинноволновой части частотного диапазона, в котором ϵ быстро увеличивается, но выше 15 ГГц изменения ϵ не значительные. Искажения в области длинноволнового диапазона связаны с ростом углового отклонения максимума диаграммы направленности рупоров с уменьшением частоты.

4. Заключение

Применение векторных анализаторов цепей для экспериментальных измерений на бистатической установке в свободном пространстве позволяет повысить точность измерений частотных зависимостей диэлектрической проницаемости при

использовании формулы Брюстера. Но достигается это только тогда, когда в алгоритме анализа угловых зависимостей амплитуды отраженной волны применяется функция временной селекции в векторном анализаторе цепей с выбором в трансформируемом временном интервале отклика отраженной волны только от первой границы измеряемой пластины. При этом устраняется частотная зависимость, связанная с электрической толщиной пластины, а зависимость $\varepsilon(f)$ и связь с эффектом Брюстера остается, за счет чего повышается точность измерений. Важно, что в предлагаемой измерительной процедуре диэлектрическая проницаемость для всех выбранных точек внутри частотного диапазона определяется с одинаковой точностью, а ограничение частотного диапазона определяется только используемой измерительной аппаратурой. Видно, что потенциальная точность метода, за счет повышения точности преобразований во временной области, будет повышаться при расширении частотного диапазона с одновременным увеличением в будущем числа анализируемых частотных точек в векторном анализаторе цепей.

Таким образом, предлагаемая процедура обработки экспериментальных данных позволяет в полной мере реализовать возможности векторных анализаторов цепей для повышения точности определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости материалов в свободном пространстве.

Список литературы

1. Крылов В.П., Чирков Р.А. Измерение диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков в свободном пространстве при падении волны на пластину под углом Брюстера // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 7. С. 102–113.
2. Крылов В.П. Интерпретация физических условий возникновения эффекта Брюстера в рамках геометрической оптики // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 9. С. 170–174.