

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЧ-ВОЛНОВОДОВ

В. И. БОРИСОВ, А. В. КАРПЕНКО

ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Могилев, Беларусь

Диэлектрические волноводы составляют основу волоконных и интегрально-оптических устройств. Но в задачах радиоволнового неразрушающего контроля диэлектрические волноводы применяются недостаточно, хотя их использование дает возможность расширить методологические основы такого контроля, это обусловлено тем, что моды диэлектрических волноводов представляют собой неоднородные (эванесцентные) волны, которые распространяются не только по материалу диэлектрического волновода, но также проникают в граничную с волноводом среду, окружающую волновод. Глубина проникновения их в граничную среду зависит от разности диэлектрических проницаемостей материала из которого изготовлен волновод и окружающей волновод среды. Для воздушной среды эта глубина проникновения порядка длины волны излучения, распространяющегося по волноводу, что при применении электромагнитных волн сантиметрового диапазона позволяет расположить вблизи поверхности волновода различные управляющие и регистрирующие устройства.

В предлагаемой работе приводятся результаты измерения диэлектрической проницаемости некоторых полимерных и жидких материалов на длине волны 32 мм. Измерения для полимерных слоистых материалов проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1, а.

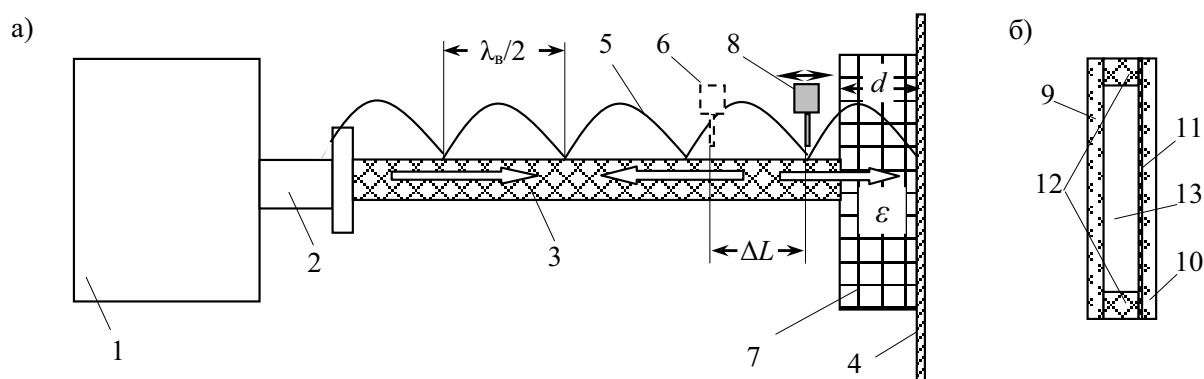


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

СВЧ-излучение от генератора Г4-109 через металлический волновод 2 вводится в одномодовый диэлектрический волновод 3 прямоугольного поперечного сечения размерами 23×10 мм, изготовленный из фторопласта.

Пройдя по волноводу 3, волна отражается от плоского алюминиевого зеркала 4, которое изначально устанавливается вплотную к выходному торцу диэлектрического волновода 3. В результате в волноводе образуется стоячая волна 5, период которой равен половине длины волны в волноводе $\lambda_{\text{в}}$. Так как в работе используется одномодовый диэлектрический СВЧ-волновод, в котором электромагнитная волна распространяется в виде основной моды с эффективным показателем преломления $n_{\text{эф}}$, то вблизи поверхности волновода также образуется стоячая волна с тем же периодом, что и в волноводе. Использование же в качестве отражателя СВЧ-излучения металлического зеркала приводит к тому, что узел стоячей волны всегда располагается на поверхности зеркала от которой отражается излучение. Для регистрации распределения излучения в стоячей волне вблизи поверхности волновода устанавливается зонд детекторной секции 6 в такое положение, где наблюдается узел стоячей волны. Этот зонд имеет возможность перемещаться контролируемым образом вдоль продольной оси волновода. Между выходным торцом волновода и металлическим зеркалом располагается контролируемый образец 7 с неизвестной диэлектрической проницаемостью ε и известной толщиной d . Он устанавливается таким образом, что одна его поверхность располагается вплотную к выходному торцу волновода, а другая – вплотную к поверхности зеркала. После установки зеркала, узлы стоячей волны смещаются в направлении зеркала на расстояние ΔL , которое измеряется перемещением зонда в новое положение 7. Оптический путь, проходимой СВЧ-волной по волноводу на расстоянии ΔL , равен оптическому пути проходимой волной через контролируемый образец, из чего определяется расчетная формула для неизвестной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L \cdot n_{\text{эф}}}{d} \right)^2. \quad (1)$$

Для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей в описанной выше установке вместо полимерного образца 7 и зеркала 4 устанавливается кювета (рис. 1. б), состоящая из двух стеклянных пластинок 9 и 10, на одну из которых в данном случае 10, нанесено алюминиевое покрытие 11, играющее роль зеркала для СВЧ-волны. Пластинка 9 устанавливается в контакте с выходным торцом диэлектрического волновода. Толщина кюветы определяется толщиной полимерных пластинок 12, к которым приклеены стеклянные пластинки 9, 10. Размеры кюветы в плоскости, перпендикулярной оси волновода превышали его размеры на 3 см по обоим направлениям для того, чтобы неоднородные волны волновода распространялись через измерительную кювету. При измерениях диэлектрической проницаемости жидкостей сначала устанавливается пустая кювета и в этом положении определяется положение узла стоячей волны, а затем, не снимая кюветы, в нее наливается контролируемая жидкость и определяется новое положение того же самого

узла стоячей волны. По величине сдвига узла формула (2) рассчитывается диэлектрическая проницаемость.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L \cdot n_{y0}}{d} + 1 \right)^2. \quad (2)$$

Эффективный показатель преломления волноводной моды определяется на применяемой экспериментальной установке следующим образом. Вплотную к выходному торцу волновода устанавливается металлическое зеркало для образования в волноводе стоячей волны, а затем путем перемещения зонда детекторной секции вдоль продольной оси волновода определяется период стоячей волны в волноводе. Для уменьшения погрешности величины периода стоячей волны измеряется расстояние вдоль оси волновода, соответствующее 7–10 периодам, с последующим делением этого расстояния на число периодов. Тогда эффективный показатель преломления моды волновода равен отношению половины длины используемого СВЧ-излучения к периоду стоячей волны в волноводе.

Расчет диэлектрической проницаемости по формулам (1, 2) необходимо проводить для твердых и жидких слоев, толщина которых не превышает половину длины волны используемого излучения в материале контролируемого образца. Это ограничение связано с тем, что при измерении, порядок интерференционного минимума при постановке контролируемого образца не должен изменяться. Однако измерения можно проводить и при перемещениях зонда детекторной секции на величину более одного порядка, если известно приблизительное значение диэлектрической проницаемости контролируемого материала.

Были проведены измерения относительной диэлектрической проницаемости полистирола, фторопласта, винипласта, органического стекла и плавленного кварца, усредненные по 10 независимым измерениям. Они дали следующие результаты:

- для образца из полистирола толщиной 2,7 мм – $\varepsilon=1,86\pm 0,10$.
- для образца из фторопласта толщиной 3,2 мм – $\varepsilon=1,56\pm 0,05$.
- для винипластового образца толщиной 7,7 мм – $\varepsilon=3,01\pm 0,14$.
- для образца из оргстекла толщиной 5 мм – $\varepsilon=3,31\pm 0,09$.
- для образца из плавленного кварца марки КВ толщиной 14 мм – $\varepsilon=4,43\pm 0,02$.

По результатам 16 измерений было получено значение диэлектрической проницаемости водопроводной воды: $31,7\pm 0,7$.