

Определение свойств материалов для изоляторов СВЧ-соединителей

В.Н. Бирюков, С.И. Губин, О.В. Федоренко

ПО «Октябрь»

Аннотация: в данной работе были рассчитаны, измерены, сравнены с расчетные и справочные параметры материала, планируемого для применения в качестве изолятора в СВЧ-соединителях с повышенной пропускной мощностью

Ключевые слова: СВЧ-соединители, СВЧ-материалы, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость

1. Введение

Для расширения эксплуатационных свойств СВЧ-соединителей проводятся в т.ч. и работы по увеличению пропускной СВЧ-мощности. Пропускная мощность определяется напряжением пробоя и выдерживаемым проходным током. Полагая волновое сопротивление неизменным невозможно компенсировать увеличение пропускной мощности увеличением только одного из параметров, поэтому необходимо достигать как увеличения напряжения пробоя, так и увеличения выдерживаемого проходного тока. Ограничения по току связаны с возможностью отведения изолятором тепла, выделяемого на переходном сопротивлении, при протекании тока. При недостаточном отведении тепла происходит нагрев проводника и изолятора и оплавление изолятора. Поэтому изоляторы для коаксиальных и полосковых линий передачи СВЧ-сигналов повышенной мощности должны обладать такими свойствами, как низкая диэлектрическая проницаемость, малые диэлектрические потери, хорошая теплопроводность, высокое пробивное напряжение и большой диапазон рабочих температур.

Среди импортных материалов, обладающих таким набором свойств, следует отметить материал Fluoroloy H (композит из фторопласта и керамики). Диэлектрическая проницаемость на частоте 1 МГц от 2,3 до 2,5. Коэффициент теплопроводности в 5 раз выше, чем у фторопласта. Этот материал применяется в некоторых соединителях TNC и SMA, выпускаемых фирмами в США, Германии и Швейцарии [1]. Среди отечественных материалов, способных заменить материал Fluoroloy H, следует обратить внимание на материал Ф4АО10 ТУ 301-05-42-89. В настоящее время, изготовителем, этот материал рекомендуется к применению в качестве изоляторов в коммутирующих приборах в условиях высокотемпературной электрической дуги. Этот композитный материал содержит фторопласт Ф4 и 10% мелкодисперсную порошковую окись алюминия A_2O_3 . Фторопласт и поликор (A_2O_3) широко применяются в технике СВЧ.

Для определения возможности применения материала Ф4АО10 в соединителях, на предприятии были проведены работы по определению ряда его параметров, в частности расчет диэлектрической проницаемости, расчет теплопроводности, измерение диэлектрической проницаемости материала Ф4АО10 и типовых материалов, применяемых в качестве изоляторов в СВЧ-соединителях.

2. Проведение работ

2.1 Расчет диэлектрической проницаемости материала Ф4АО10

Для расчета диэлектрической проницаемости полимерных композитных материалов предложено много эмпирических и полуэмпирических формул [2]. Результаты расчета по ним приводят к разным результатам. Остановимся на двух, наиболее подходящих, на основании физических процессов, формулах [2]:

$$\varepsilon_{эф} = \left(\frac{v_1}{\varepsilon_1} + \frac{v_2}{\varepsilon_2} \right)^{-1} \text{ и } \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{эф}) \cdot v_1}{(\varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_{эф})} + \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_{эф}) \cdot v_2}{(\varepsilon_2 + 2 \cdot \varepsilon_{эф})} = 0 \quad (1)$$

Где: ε_1 - диэлектрическая проницаемость вещества, в которое вводится добавка; v_1 - объемная доля вещества, в которое вводится добавка; ε_2 - диэлектрическая проницаемость вводимого вещества; v_2 - объемная доля вводимого вещества; $\varepsilon_{эф}$ - эффективная проницаемость полимерного двухкомпонентного композитного материала.

Параметры фторопласта и окиси алюминия приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры образцов

Материал	Коэффициент Теплопроводности, Вт/мК	Диэлектрическая проницаемость
Фторопласт	0,233	2,08
A ₂ O ₃	30	9,8

Для материала ФАО10, состоящего из фторопласта и 10% окиси алюминия A₂O₃: $\varepsilon_1 = 2,08$; $v_1 = 0,9$; $\varepsilon_2 = 9,8$; $v_2 = 0,1$ (Здесь учтено, что $v_1 + v_2 = 1$).

Вычисления по первой формуле дают результат $\varepsilon_{эф} = 2,26$, а по второй $\varepsilon_{эф} = 2,47$

2.2 Расчет коэффициента теплопроводности материала Ф4АО10

По теории Максвелла-Бургера-Эйкена стр. 87 [2]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \cdot L \cdot v_2}{1 + (L - 1) \cdot v_1} \right) \text{ для шаровых зерен } L = \frac{3 \cdot \lambda_1}{2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2} \quad (2)$$

Где: λ_1 - коэффициент теплопроводности вещества, в которое вводится добавка; v_1 - объемная доля вещества, в которое вводится добавка; λ_2 - коэффициент теплопроводности вводимого вещества; v_2 - объемная доля вводимого вещества; $\lambda_{эф}$ - эффективный коэффициент теплопроводности полимерного двухкомпонентного композитного материала.

Для материала Ф4АО10, состоящего из фторопласта 4 и 10% окиси алюминия A₂O₃, запишем: $\lambda_1 = 0,233$ Вт/мК; $v_1 = 0,9$; $\lambda_2 = 30$ Вт/мК; $v_2 = 0,1$.

Вычисления приводят к результату: $\lambda_{эф} = 1,02$ Вт/мК; (Fluoroloy H $\lambda_{эф} = 1,2$ Вт/мК).

2.3 Измерение диэлектрической проницаемости материала Ф4АО10

Измерение диэлектрической проницаемости проводилось путем анализа коэффициента отражения от диэлектрической шайбы помещенной в воздушную коаксиальную линию. Для этого был изготовлен отрезок однородной коаксиальной линии с разъемами типа SMA. Обоснование метода измерений приведено ниже.

На Рисунке.1 приведен вид воздушной коаксиальной линии с диэлектрической шайбой, с учетом допусков на изготовление шайбы и коаксиальной линии.

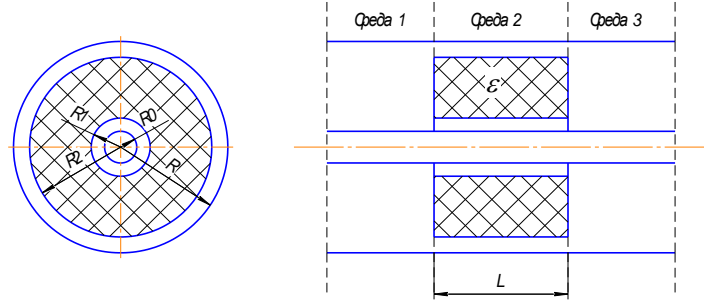


Рисунок 1. Воздушная коаксиальная линия с диэлектрической шайбой, с учетом допусков на изготовление шайбы и коаксиальной линии

Здесь: СРЕДА 1 и СРЕДА 3 – участки воздушной коаксиальной линии; СРЕДА 2 – диэлектрическая шайба; ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала шайбы.

При многослойной изоляции в коаксиальной линии эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эф}$, с учетом обозначений Рис.1, вычисляется по формуле [3]:

$$\frac{1}{\varepsilon_{эф}} \cdot \ln\left(\frac{R}{R0}\right) = \ln\left(\frac{R1}{R0}\right) + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{R2}{R1}\right) + \ln\left(\frac{R}{R2}\right) \quad (3)$$

Так как коэффициент отражения от шайбы зависит от эффективной диэлектрической проницаемости, а нам необходимо знать диэлектрическую проницаемость материала шайбы, то преобразуем формулу (1) к виду

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{R1}{R0}\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{эф}} \cdot \ln\left(\frac{R}{R0}\right) - \ln\left(\frac{R2 \cdot R}{R0 \cdot R1}\right)} \quad (4)$$

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициент отражения электромагнитной волны от шайбы вычисляется по формулам [3]:

$$K = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}; \quad \Gamma = \frac{Z_2 \cdot (Z_3 - Z_1) \cdot \cos(k_2 \cdot L) + (Z_2^2 - Z_1 \cdot Z_3) \cdot \sin(k_2 \cdot L)}{Z_2 \cdot (Z_3 + Z_1) \cdot \cos(k_2 \cdot L) + (Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_3) \cdot \sin(k_2 \cdot L)} \quad (5)$$

где: Z_1 , Z_2 и Z_3 - волновые сопротивления участков коаксиальной линии 1, 2 и 3 соответственно; k_2 - коэффициент распространения электромагнитной волны в среде 2. $|\Gamma|$ - модуль коэффициента отражения от шайбы; K - величина КСВН.

Для коаксиальной линии:

$$Z_1 = Z_3 = 60 \cdot \ln\left(\frac{R}{R0}\right); Z_2 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{эф}}} \cdot \ln\left(\frac{R}{R0}\right); k_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c \cdot \sqrt{\varepsilon_{эф}}} \quad (6)$$

где f - частота; c – скорость света, $\varepsilon_{эф}$ - эффективная диэлектрическая проницаемость материала шайбы при $R0 = R1$ и $R = R2$.

Отрезок однородной коаксиальной линии с разъемами типа SMA, при помощи которого проводились измерения, имеет отношение диаметров 3,5/1,5 мм.

Изолятор (шайба) из материала Ф4АО10 имеет размеры: длина 15,0 мм; наружный диаметр 3,48 мм; диаметр внутреннего отверстия 1,51 мм.

В Таблице 2 приведены результаты измерения КСВН отрезка коаксиальной линии с шайбой.

Таблица 2. Зависимость КСВН от частоты

		Ф4АО10							
Частота, ГГц		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25
КСВН		1.18	1.29	1.4	1.52	1.64	1.76	1.87	1.97
Частота, ГГц		2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25
КСВН		2.06	2.14	2.19	2.22	2.23	2.22	2.19	2.13
Частота, ГГц		4.5	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25
КСВН		2.06	1.97	1.87	1.75	1.63	1.51	1.38	1.27

Для обработки результатов измерений применялся метод наименьших квадратов [4]. Для этого составлялась сумма квадратов разности между измеренными и вычисленными по формулам (5) и (6) значениями КСВН.

$$S = \sum_{i=1}^N (K_u(i) - K_p(i, \varepsilon_{эф}))^2 \quad (7)$$

где: $K_u(i)$ - измеренная величина КСВН на частоте f_i из таблицы 2, где индекс $i = 1, 2, \dots, N$, ($N = 26$ для таблицы 2); $K_p(i, \varepsilon_{эф})$ - величина КСВН вычисленная по формулам (5) и (6) на частоте f_i при заданной величине $\varepsilon_{эф}$.

Далее, подбиралось такое значение величины $\varepsilon_{эф}$, при котором значение S имело наименьшую величину.

В результате обработки результатов измерений по данным таблицы 2 получилось, что $\varepsilon_{эф} = 2,2$. Подстановка этого значения в формулу (4) приводит к результату $\varepsilon = 2,26$.

Аналогичным образом, для тестирования методики измерений, в том же диапазоне частот, были проведены измерения диэлектрической проницаемости материалов: Фторопласт, Арфлон и РЕЕК.

Примечание: Вычисления диэлектрической проницаемости проводились в предположении, что потери отсутствуют и тангенс угла диэлектрических потерь $tg(\delta) = 0$. Приведенная методика позволяет учитывать и потери в диэлектрике. Для этого, в формуле (5) следует заменить синусы и косинусы на их гиперболические аналоги, а коэффициент распространения электромагнитной волны k_2 заменить на $\tilde{k}_2 = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot tg(\delta) + i \cdot k_2$ [3]. В этом случае, функцию $K_p(i, \varepsilon_{эф})$, в формуле (7), следует заменить на функцию $K_p(i, \varepsilon_{эф}, tg(\delta))$ и при вычислении методом наименьших квадратов подбирать значения $\varepsilon_{эф}$ и $tg(\delta)$ до достижения значения S , в формуле (7),

минимальной величины.

Результаты измерений приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений

Материал	ТУ	Диэлектрическая проницаемость	
		Измеренная	Справочные данные
Фторопласт	ГОСТ 10007-80	$\varepsilon = 2,08$	$\varepsilon = 1,9 - 2,1$
Арфлон	ТУ 2291-003-14502248-2016	$\varepsilon = 2,1$	$\varepsilon = 2,1 - 2,2$
РЕЕК	ТУ 2246-001-15210588-2014	$\varepsilon = 2,91$	$\varepsilon = 2,2 - 3,3$
Ф4АО10	ТУ 301-05-42-89	$\varepsilon = 2,26$	$\varepsilon = 2,26$ (расчет метод 1), $\varepsilon = 2,47$ (Расчет метод 2)

3 Заключение

Проведенные измерения диэлектрической проницаемости материалов Фторопласт, Арфлон и РЕЕК на значения диэлектрической проницаемости которых имеются справочные данные, подтверждают достоверность методики измерений и измеренной и расчетной величины диэлектрической проницаемости материала Ф4АО10;

Расчетная величина коэффициента теплопроводности материала Ф4АО10 показывает, что его теплопроводность примерно в 4,3 раза выше теплопроводности фторопласта и его применение в устройствах СВЧ позволит значительно увеличить допустимую пропускаемую мощность по сравнению с устройствами, в которых в качестве изолятора применен фторопласт;

По совокупности свойств отечественный материал Ф4АО10 сравним с импортным материалом Fluoroloy H.

Продолжены работы по применению материала Ф4АО10 в модернизируемых соединителях

Список литературы

1. Прокимов А.А, Джуринский К.Б, Смирнова Ю.А «Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей». Ж. «Компоненты и технологии» №2, 2017г.
2. В.Г. Шевченко ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» МОСКВА 2010.
3. Н.А.Семенов «Техническая электродинамика», М. Связь, 1973 г.
4. И.Н.Бронштейн, К.А.Семиндяев «Справочник по математике» М. Наука, 1986 г.