

УДК 537.874

## СВОЙСТВА КОМПОЗИТА ПОЛИСТИРОЛ–РУТИЛ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Е. Е. Чигряй, И. П. Никитин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2018 г.

**Аннотация.** Представлена модель композиционного материала, состоящего из мелкодисперсного порошка рутила в полистироловой матрице. Диэлектрические свойства материала на миллиметровых волнах описываются с помощью формул, справедливых для статических электрических полей. Для расчета комплексной диэлектрической проницаемости композита используется эмпирическая формула Лихтенеккера. Получена зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости композита полистирол–рутил на миллиметровых волнах от объемного содержания компонентов. Экспериментальная проверка модели проведена на образцах композита полистирол–рутил изготовленных на ГНПП "Исток". Измерения проводились на частоте 70 ГГц при двух значениях концентрации рутила с помощью стандартной методики исследования диэлектриков на миллиметровых волнах. Полученные результаты показали хорошее согласие с моделью: отличие измеренных действительной части диэлектрической проницаемости от модельных значений составляет не более 1%.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, композиты, полистирол, рутил, формула Лихтенеккера.

**Abstract.** A model of a composite material consisting of a finely dispersed powder of rutile in a polystyrene matrix is presented. The dielectric properties of the material in the millimeter wave range are described by formulas that are valid for static electric fields. Lichtenecker's empirical formula is applied to the calculation of the complex dielectric permittivity of the composite. The real and imaginary parts of the

permittivity of the rutile–polystyrene composite are obtained as a function of the volume concentration of the components in the millimeter-wave range. The experimental verification of the model is carried out on rutile–polystyrene samples prepared at the Research and Production Corporation "Istok," Fryazino, Moscow region. The samples were in the form of disks with diameter of 100 mm and thickness of 2.3 mm. The measurements were carried out at frequency of 70 GHz on samples with two values of the concentration of rutile by the standard method of investigation of dielectric materials in the millimeter wave range and did not reveal any appreciable dispersion in the dielectric properties along the plane of the samples, which is indicative of uniform distribution of the rutile powder in the polystyrene matrix. The real and imaginary parts of the permittivity calculated within the model are in good agreement with the results of measurements of the real composite: the difference between the measured and the model values is less than 1% for the real part and about 5% for the imaginary part. The model proposed provides a convenient tool for the design of materials with prescribed dielectric properties that can be used as matching layers between media with strongly different dielectric properties in various fields of application of millimeter waves.

**Key words:** (dielectric) permittivity, composite, polystyrene, rutile, Lichtenecker's formula.

## 1. Введение

При решении многих практических задач в технике СВЧ и миллиметровых волн возникает необходимость согласования двух сред с различными электрическими свойствами. С особой остротой эта проблема встает при исследовании водных растворов различных веществ, при измерении влажности материалов с помощью СВЧ и миллиметровых волн, а также при исследованиях биологических объектов и при различных применениях миллиметровых волн в медицине, в связи с высокими значениями мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости воды в указанном диапазоне волн. Обеспечение согласования с такими средами требует создания

материалов с заданными (достаточно высокими) значениями диэлектрической проницаемости (показателя преломления) [1]. В настоящее время во многих областях промышленности широкое применение находят композиционные материалы. Композиционным материалом, или композитом, называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов. Выбор компонентов диктуется целями и задачами, на решение которых данный композит предназначен. Как правило, первый компонент представляет собой некоторый связующий материал, матрицу, в качестве которой используют, полимеры, эластомеры, смолы и пр. Второй компонент определяет свойства композита и в зависимости от назначения последнего, может представлять собой наполнитель в виде решетки, волокон, а также порошков различных материалов. Для решения задачи согласования двух сред с сильно различающимися значениями диэлектрической проницаемости целесообразно использовать порошок материала с высоким значением показателя преломления, равномерно распределенный в полимерной матрице. Наиболее подходящей кандидатурой для второго компонента является, например, двуокись титана (рутил), статическая диэлектрическая проницаемость которого достигает 130. В качестве первого компонента для таких целей используют полимеры, характеризующиеся низким коэффициентом поглощения в СВЧ и миллиметровом диапазонах волн. В настоящей работе рассматривается композиционный материал, представляющий собой тонкодисперсный порошок рутила равномерно распределенный в матрице полистирола.

## 2. Построение модели КПР

Для построения модели композита полистирол–рутил (КПР) были использованы данные по  $\text{TiO}_2$  из [2]. Рутил  $\text{TiO}_2$  имеет показатель преломления  $n = 9.4$  при температуре  $20^\circ \text{C}$  (изменение  $n$  в диапазоне частот 180–600 ГГц составляет менее 0.1). Потери составляют от 1.5 дБ/мм на частоте 210 ГГц до 6.0 дБ/мм на частоте 450 ГГц, увеличиваясь пропорционально квадрату

частоты. На частоте 70 ГГц потери составляют 1.7 дБ/см, а  $\varepsilon''$  вычисляется по формуле

$$\varepsilon'' = \frac{2n\alpha c}{54.575f} \quad (1)$$

и равняется  $\varepsilon'' = 0.251$ .

В качестве второго компонента в КПП используется полистирол УПМ0903 с удельным весом  $\rho = 1.06 \text{ кг/м}^3$ . Наши исследования образцов полистирола в диапазоне частот от 70 ГГц до 300 ГГц показали, что диэлектрическая проницаемость полистирола остается постоянной в указанном диапазоне частот и равна  $\varepsilon = 2.523 \pm 0.5\%$ , а  $\text{tg}\delta$  возрастает от частот  $<100 \text{ ГГц}$ , где он равен  $10^{-4}$ , до  $2 \cdot 10^{-3}$  на частоте 300 ГГц.

При выборе модели были использованы рекомендации, приведенные в [3]. Композиции полистирола, наполненные тонкодисперсным рутилом относятся к матричным смесям и хорошо описываются формулой Лихтенеккера

$$\ln \varepsilon = W_1 \ln \varepsilon_1 + W_2 \ln \varepsilon_2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость композиции,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости компонент,  $W_1$  и  $W_2$  – объемное содержание наполнителя и матрицы. Полагая диэлектрические проницаемости в (2) комплексными  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ , можно разрешить (2) относительно  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  смеси. Используя известные соотношения  $\ln \varepsilon = \ln|\varepsilon| + i\delta$ ,  $|\varepsilon| =$ , и  $\delta = \text{arctg} \varepsilon''/\varepsilon'$ , получим [4]

$$\varepsilon^* = p \cos\delta + ip\sin\delta, \quad (3)$$

где

$$p = |\varepsilon| = \exp(W_1 \ln|\varepsilon_1| + W_2 \ln|\varepsilon_2|),$$

$$\delta = W_1 \delta_1 + W_2 \delta_2$$

и

$$\text{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \text{tg}(W_1 \delta_1 + W_2 \delta_2). \quad (4)$$

На частоте 70 ГГц, в модели используются следующие характеристики исходных материалов:  $\varepsilon'_1 = 88.4$ ,  $\varepsilon''_1 = 0.251$ ,  $\varepsilon'_2 = 2.523$ ,  $\varepsilon''_2 = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Потери  $\alpha$

$$\alpha = \frac{4\pi f}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon} \quad (5)$$

изменяются от  $4 \cdot 10^{-2}$  дБ/см при  $W_1 = 10\%$  до  $2 \cdot 10^{-1}$  дБ/см при  $W_1 = 40\%$ .

При изготовлении композита с нужными параметрами вычисляется объемное содержание рутила в композиции

$$W_1 = \frac{\ln|\varepsilon| - \ln|\varepsilon_2|}{\ln|\varepsilon_1| - \ln|\varepsilon_2|}. \quad (6)$$

Связь между объемным содержанием  $W_1$  и весовым  $P_1$  задается формулой

$$P_1 = \frac{W_1 k}{1 - W_1 + W_1 k},$$

где  $k = \rho_1/\rho_2$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности рутила ( $\rho_1 = 4.24$  г/см<sup>3</sup>) и полистирола ( $\rho_2 = 1.06$  г/см<sup>3</sup>).

### 3. Метод исследования

Аппаратура и методы исследования диэлектриков на миллиметровых и субмиллиметровых волнах разработаны в [5]. Для измерения показателя преломления эффективно используются интерферометры Майкельсона и Рождественского. Показатель преломления определяется по разности хода лучей при помещении измеряемого образца в одно из плеч интерферометра. При этом для однозначного определения  $n$  в интерферометр подается широкий спектр частот [6]. Разработана также методика измерения показателя преломления с помощью измерителей КСВ Р2-69, Р2-68, Р2-65 и др. В этом случае наблюдается частотная зависимость коэффициента отражения при наложении образца на рупор, и фиксируются частоты минимумов отражения. Показатель преломления определяется по разности частот между минимумами коэффициента отражения [7]. Для определения потерь в материале

плоскопараллельный образец помещается в измерительный тракт и измеряется коэффициент прохождения на частотах максимального прохождения. В случае слабопоглощающих образцов, когда коэффициент прохождения на максимуме близок к единице, используется резонаторный метод [2], в котором потери в образце определяются по изменению добротности резонатора при помещении в него исследуемого образца.

#### 4. Результаты измерений

Результаты измерений диэлектрических характеристик КПП с весовым содержанием рутила 50% и 70% представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Диэлектрические характеристики образцов композита полистирол–рутил.

№ п/п	Содержание TiO <sub>2</sub>		на длине волны $\lambda = 0.441$ см ( $f = 68.03$ ГГц)					
	$P_1$ (вес. %)	$W_1$ (об. %)	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$N$	$\kappa$	$\alpha$ , дБ/см	$\text{tg}\delta$
1	50	20	5.05	$2 \cdot 10^{-3}$	2.25	$4 \cdot 10^{-4}$	0.06	$4 \cdot 10^{-4}$
2	70	36.8	9.49	$7 \cdot 10^{-3}$	3.08	$1 \cdot 10^{-3}$	1.14	$7 \cdot 10^{-4}$

Здесь  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ,  $n^* = n + ik = \sqrt{\epsilon}$ ,  $\alpha = 4\pi f\kappa/c$ ,  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ ,  $c$  – скорость света,  $f$  – частота.

На рис. 1 и 2 сплошными линиями представлены действительная и мнимая частей диэлектрической проницаемости композита рассчитанные по нашей модели на частоте 70 ГГц при объемной концентрации рутила в интервале от 0 до 60%. Измерения, проведенные на частоте 70 ГГц при двух значениях объемного содержания рутила 20% и 36.8%, показаны на тех же рисунках символами. Из рис. 1 видно, что измеренные значения  $\epsilon'$  очень хорошо согласуются с результатами расчета. В то же время рис. 2 показывает существенное различие экспериментальных значений  $\epsilon''$  от модельных, что может быть объяснено как погрешностью дозирования компонентов, их локально неоднородным распределением, или погрешностью измерений. Впрочем, это различие не является серьезным препятствием для решения упомянутых выше

задач, поскольку влиянием малых значений мнимой части на параметры согласующих слоев можно пренебречь.

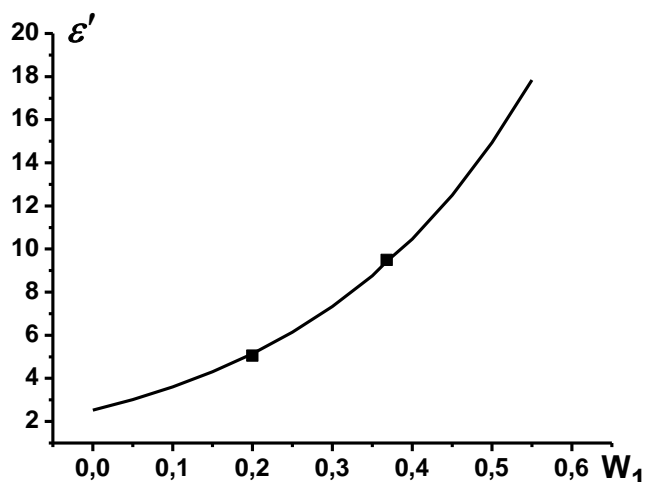


Рис. 1. Действительная часть диэлектрической проницаемости композита рассчитанная в зависимости от объемной концентрации рутила на частоте 70 ГГц. Символами указаны измеренные значения  $\epsilon'$ .

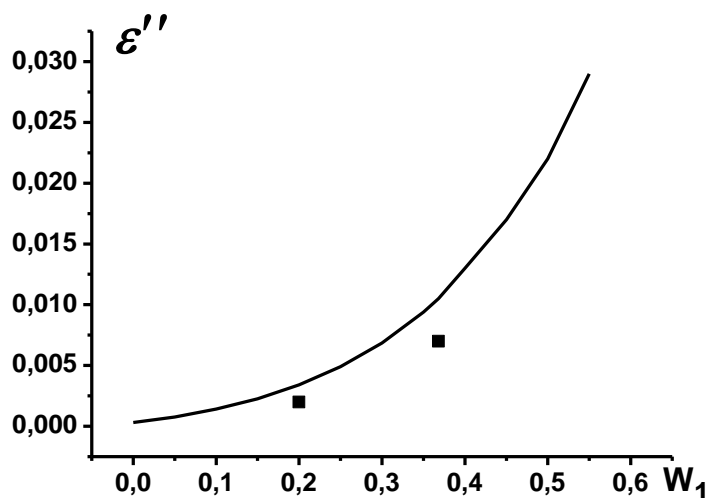


Рис. 2. Мнимая часть диэлектрической проницаемости композита рассчитанная в зависимости от объемной концентрации рутила на частоте 70 ГГц. Символами указаны измеренные значения  $\epsilon''$ .

## 5. Заключение

Рассмотрена модель композиционного материала, состоящего из порошка рутила в полистироловой матрице, для создания согласующих слоев для материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости, в

миллиметровом диапазоне волн. Эксперименты, проведенные на частоте 70 ГГц при разных значениях концентрации наполнителя, показали хорошее согласие с моделью. Исследованный композит полистирола с рутилом имеет широкие области применения в исследовании свойств материалов с высокой диэлектрической проницаемостью на миллиметровых волнах, а также для создания антенн-аппликаторов для медицинского применения миллиметровых и СВЧ волн.

### Литература

1. Е.Е. Чигряй, Ю.Г. Яременко, Согласование границы раздела при облучении водных биорастворов миллиметровыми волнами. // Миллиметровые волны в медицине: Сб. докладов: М.: ИРЭ АН СССР, 1991, Т. 2. С. 501–504.
2. В.В. Мериакри, Свойства и применение сегнетоэлектриков в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн. // Высокочастотные свойства твердых тел: Киев: Наукова думка, 1985, стр. 153.
3. Электрические свойства полимеров, под ред. Б.И. Сажина, Л.: Химия, 1977. 192 с.
4. Е.Е. Чигряй, Исследование композиции полистирол-рутил на миллиметровых волнах, I Всеросс. науч.-тех. конф. " Актуальные проблемы технологии композиционных материалов", Тез. докл., Ялта, 1980, стр. 130.
5. В.В. Мериакри, В.Н. Аплеталин, А.Н. Копнин, Г.А. Крафтмахер, М.Г. Семенов, Е.Ф. Ушаткин, Е.Е. Чигряй, Субмиллиметровая лучеводная спектроскопия и ее применения. // Успехи современной радиотехники и электроники, под ред. В.А. Котельникова: М: Наука, 1980.
6. В.В. Мериакри, Е.Ф. Ушаткин, Измерение показателя преломления на субмиллиметровых волнах. ПТЭ. 1973. №2. С. 143–145.
7. Е.Е. Чигряй, Г.И. Хохлов, И.П. Никитин, Делители квазиоптического пучка на тонких диэлектрических пленках в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. // Журнал радиоэлектроники [ электронный журнал]. 2016. № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun16/9/text.pdf>



**Для цитирования:**

Е. Е. Чигряй, И. П. Никитин. Свойства композита полистирол-рутил на миллиметровых волнах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/20/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.20