

УДК 621.371, 621.372

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В БЛИЖНЕЙ И ДАЛЬНОЙ ЗОНАХ ИЗЛУЧЕНИЯ НА САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

С. В. Маречек, О. А. Дьяконова

**ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190 г. Фрязино, Моск.
обл., пл. Введенского, 1**

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2017 г.

Аннотация. В данной работе рассматриваются методы и средства для измерения коэффициентов прохождения электромагнитного излучения через образцы плоских тонких листовых материалов в ближней и дальней зонах излучателя. Продемонстрирована работоспособность этих методов при измерении реальных образцов в свободном пространстве. Проведены исследования образцов материалов в ближней зоне излучателя с различной структурой поля (электрической и магнитной) на частотах 1...8.5 ГГц. Получена возможность экспресс – измерения образцов материалов небольших размеров. Измерения в дальней зоне излучения выполнены в диапазоне частот 5.6...17.5 ГГц. Экспериментально показано хорошее совпадение результатов измерений в перекрываемом диапазоне частот.

Ключевые слова: измерения в ближней и дальней зонах излучения, векторные и скалярные анализаторы цепей, свободное пространство, коэффициенты прохождения, сантиметровые волны.

Abstract. This paper discusses methods and tools for measuring the transmission coefficients of electromagnetic radiation through a sample of flat thin sheet materials in the near and far field emitter. The efficiency of these methods was demonstrated when measurements were carried out on the actual samples in free space. Investigations of sample materials in the near zone of the emitter structure with different fields (the electric and magnetic) at frequencies of 1 ... 8.5 GHz were fulfilled. Two types of matching elements of emitters were manufactured and used:

in the form of pings (for electric field) and rings (for magnetic field). Measurements of radiation in the far zone were made in the frequency range 5.6 ... 17.5 GHz. It is experimentally shown good agreement between the results of measurements of samples of materials for distance and near zones of radiation in the overlapping frequency range. As a result, we obtained a simple and easily implemented method of express- measurement of samples of thin film materials of small sizes in the electric and magnetic fields near the radiator area.

Key words: measurements in near and far field radiation, vector and scalar network analyzers, the measurement in free space, transmission coefficients, centimeter wave ranges.

Введение

Широкое использование тонких листовых материалов во многих областях науки и техники для защиты от электромагнитного излучения, его экранирования и поглощения, а также для снижения радиолокационной заметности требует разработки удобных методов исследования этих материалов. При создании новых материалов возникает необходимость изучения их поведения в ближней и дальней (волновой) зонах излучателя.

Проблема подавления (экранировки) электромагнитных излучений и полей должна решаться как в местах их генерации, где в основном сосредоточены электрические и магнитные переменные поля, так и вдали от источников, где преобладает волновая природа электромагнитного излучения. Эффект поглощения в материалах обусловлен наличием проводимости тока, медленными процессами поляризации и намагничивания внутренней структуры, которые требуют затрат энергии. Можно ожидать, что эффективность ослабления и экранирования тем или иным поглощающим материалом, будет зависеть от присущих ему элементарных механизмов поглощения и их эффективности взаимодействия с тем или иным переменным полем или с электромагнитной волной. Механизм взаимодействия с электромагнитной волной имеет комплексный характер, так как действует на

оба компонента переменного поля. Электромагнитное поле вблизи источника имеет сложный характер, и его структура зависит от конструкции излучателя и механизма возбуждения переменного поля. Поэтому представляет большой практический интерес исследование характеристик поглощения радиопоглощающих (РПМ) материалов в полях ближней зоны излучения и сравнения их с результатами, полученными в волновой зоне (зона Френеля и Фраунгофера). Это позволит выработать оптимальные требования к применению РПМ с разными типами механизмов поглощения электрической и магнитной энергий.

Всегда при создании новых материалов, в начале, требуются качественные измерения небольших по размеру образцов или их элементов в свободном пространстве, затем проводится анализ, а далее, в случае получения удовлетворительных результатов выбираются точные методы исследования.

Обычно материалы, используемые в экспериментальных образцах, имеют очень высокую чистоту по химическому составу, а, следовательно, и высокую цену. Традиционные дорогостоящие исследования в безэховых камерах требуют больших размеров образцов. В предлагаемой методике используются образцы малых размеров, что уменьшает затраты на новые материалы, сокращает время их изготовления.

Все отечественные и зарубежные как скалярные, так и векторные анализаторы цепей не приспособлены для измерений в свободном пространстве. Возникает необходимость согласования коаксиального тракта (выход прибора) со свободным пространством.

Целью данной работы является создание экспериментальной базы для измерения коэффициентов прохождения электромагнитного излучения через РПМ в свободном пространстве. Излучатели двух типов (штыри и кольца) были изготовлены и использованы в качестве согласующих элементов, работающих в полях ближней зоны излучения. Основопологающей целью статьи является простая и легко реализуемая методика экспресс - измерения образцов материалов небольших размеров в реальном времени.

1. Структура электромагнитного поля

Вдали от излучателя свойства поля зависят главным образом от среды, в которой распространяется волна. Поэтому пространство, окружающее источник излучения, можно разделить на три области. На расстоянии L от излучателя, превышающем

$$L \geq 2D^2 / \lambda, \text{ где } \lambda - \text{длина волны в свободном пространстве,} \quad (1)$$

располагается дальнее поле, или зона Фраунгофера. Рядом с источником излучения на расстояниях

$$L \leq \frac{D}{4} + \frac{D}{2} \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (2)$$

располагается ближняя зона [1]. В промежуточной области, где располагается зона Френеля, поле носит переходный характер между ближним и дальним. Здесь везде D - максимальный размер излучающей системы. Отношение напряженности электрического поля E к напряженности магнитного поля H представляет собой полное волновое сопротивление. В дальнем поле это отношение равно $E/H = 120 \pi / \sqrt{\varepsilon}$ Ом. В ближнем поле величина этого отношения определяется параметрами излучателя, расстоянием от него до рассматриваемой точки и диэлектрическими свойствами среды. Если в излучающей системе генерируется большой ток и низкое напряжение $E/H < 377$ ближнее поле является, в основном, магнитным, и, наоборот, если в излучающей системе малый ток и высокое напряжение $E/H > 377$, в ближнем поле преобладает электрическая составляющая.

Для излучателя в виде короткого электрического вибратора или штыря импеданс источника велик. Полное волновое сопротивление вблизи него, где преобладающим является электрическое поле, также велико. По мере увеличения расстояния интенсивность электрического поля падает, так как оно создает дополняющее его магнитное поле. В ближнем поле электрическая составляющая затухает со скоростью $1/L^3$, в то время как магнитная составляющая затухает со скоростью $1/L^2$. Поле, в котором преобладает магнитная составляющая, может быть создано, например, петлевым

излучателем. Таким образом, полное волновое сопротивление с увеличением расстояния от вибратора падает и асимптотически приближается к волновому сопротивлению, которым обладает свободное пространство в дальнем поле (Рис.1).

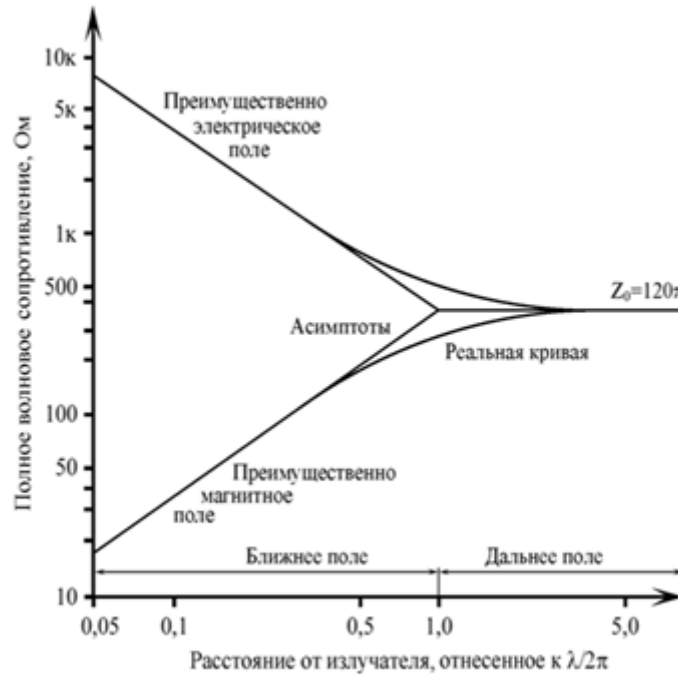


Рис.1. Зависимость полного волнового сопротивления от типа излучателя и расстояния до него.

Поместим плоский плёночный образец с поверхностным сопротивлением на квадрат ρ_s в переменное магнитное поле. В разомкнутом контуре, площадью S будет возникать ЭДС индукции $U(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$, где $\Phi(t) = S \cdot B_0 \cdot \cos \omega t \cdot \cos \alpha$, где Φ - магнитный поток через площадь контура S - с амплитудой магнитной индукции B_0 , α - угол между нормалью к поверхности контура и направлением поля.

Будем считать $\alpha=0$. Тогда $U(t) = \omega \cdot B_0 \cdot S \cdot \sin \omega t = U_0 \cdot \sin \omega t$. Мощность, поглощаемая контуром единичной площади $S=1$ и с сопротивлением r , будет равна

$$P_k = \frac{U_0 \cdot I_0}{2} = \frac{U_0^2}{2r} = \frac{\omega^2 \cdot B_0^2}{2r} \quad (3)$$

Интегральная мощность, поглощенная всей единичной площадью контура будет равна

$$P_m = K_m \frac{\omega^2 \cdot B_0^2}{\rho_s}, \quad (4)$$

где K_m - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных и технологических особенностей образца пленки.

Поместим этот же образец в переменное электрическое поле. По проводящей поверхности образца будет проходить ток. Выделим на поверхности образца квадрат со стороной l , ориентированной параллельно вектору электрического поля. На рис. 2 дана эквивалентная схема, моделирующая прохождение тока через выделенный квадрат на плёночном образце, где R_1 - полное волновое сопротивление W ; R_2 - квадрат с поверхностным сопротивлением $\rho = \rho_s$; $e(t) = l \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot E_0 \cdot \cos \omega t$ - ЭДС в области пространства противоположных сторон выделенного квадрата. Ток, протекающий по поверхности квадрата равен

$$i(t) = \frac{l \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot E_0 \cdot \cos \omega t}{W + \rho_s}. \text{ Мощность, поглощаемая единицей площади равна}$$

$$P_a = \frac{\varepsilon \cdot E_0^2 \cdot \rho_s}{2 \cdot (W + \rho_s)^2}. \quad (5)$$

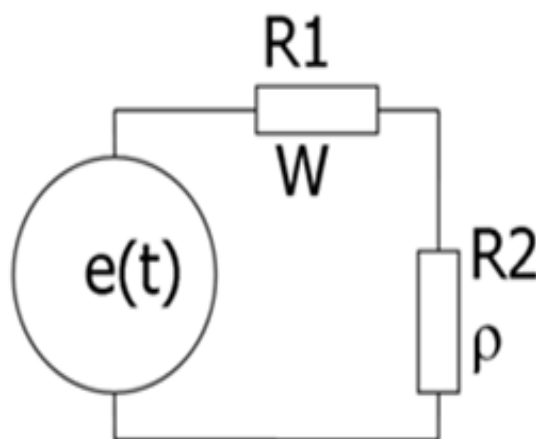


Рис.2. Эквивалентная схема, моделирующая прохождение тока в образце.

Мощность, поглощаемая выделенным квадратом, равна

$$P_s = \frac{\varepsilon \cdot l^2 \cdot E_0^2 \cdot \rho_s}{2 \cdot (W + \rho_s)^2}. \quad (6)$$

Дальнее поле излучателей одинаково и представляет собой сферическую волну, в которой, как известно, электрическая и магнитная составляющие поля затухают со скоростью $1/L$. Предположим, что среда имеет потери, тогда в дальней зоне, где закончились процессы формирования электромагнитной волны, можно написать уравнения для ее составляющих [2]

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_m \exp(-\gamma z) \exp[i\omega x(t - z/V_f)] \\ H_y &= H_m \exp(-\gamma z) \exp[i\omega x(t - z/V_f - \varphi/\omega)] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где E_x и H_y - взаимно ортогональные составляющие электрического и магнитного полей, участвующие в переносе энергии и лежащие в плоскости перпендикулярной направлению распространения z ; E_m и H_m - амплитудные значения составляющих электрического и магнитного полей; φ - фазовое запаздывание поля E к полю H ; V_f - фазовая скорость; ω - угловая скорость; γ - коэффициент затухания электромагнитной волн, который может быть выражен через диэлектрическую проницаемость среды [3]

$$\gamma = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2}[-\varepsilon' + \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}]}, \quad (8)$$

где c - скорость света в вакууме; $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ - относительная комплексная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon'' = \sigma / \omega \varepsilon_0$; σ - удельная проводимость среды ($\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$).

2. Экспериментальные установки с расположением образцов РПМ в ближней зоне излучателя

Запасенные магнитная и электрическая энергии поля, в основном, сосредоточены в ближней зоне излучателя и образуют так называемое реактивное поле. Излучение энергии из этого поля в окружающее пространство не происходит, так как существующие два вида запасенных энергий не связаны между собой в единый волновой процесс [4].

Выходная комплексная мощность генераторов поступает в область пространства занятого ближним полем, где частично поглощается средой.

Составляющие векторов электрического и магнитного полей ближней зоны могут быть рассмотрены независимо друг от друга, так как они не образуют волнового процесса. Поэтому для поддержания некоторого запаса электрической и магнитной энергий в области среды занятой ближним полем требуется отбор комплексной мощности от генераторов, а не чисто реактивной, как в случае среды без потерь. Таким образом, активная часть выходной мощности генераторов расходуется на излучение, путем создания волнового процесса в среде с поглощением и на поддержание запаса энергии электрического и магнитного полей, расположенного в ближней зоне излучателя, а реактивная часть обусловлена запасом энергии в ближней зоне и наличием мнимой части у вектора Пойнтинга. Характеристики поля определяются структурой и размерами излучателя, окружающей его средой и расстоянием от излучателя до точки наблюдения. Вблизи излучателя свойства поля определяются, в основном, его характеристиками [4].

В данной работе были разработаны и изготовлены два вида согласующих трактов с излучателями для работы в электрическом (штыри длиной 50 мм) и в магнитном (кольца диаметром 25 мм) полях ближней зоны излучения (рис. 3 а, б).

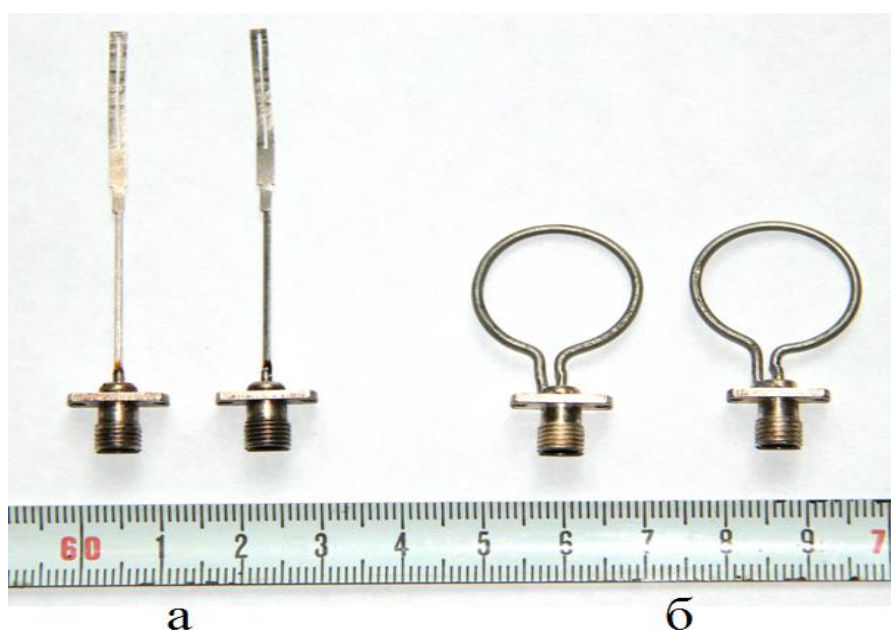


Рис. 3 а, б. Фото излучателей

(а – для электрического; б – для магнитного полей).

Измерения коэффициентов прохождения через образцы РПМ в диапазоне частот 1...8.5 ГГц проведены на установках, где базовым являлся векторный анализатор цепей E5071В фирмы Agilent Technologies. При измерениях в векторном анализаторе цепей автоматически организована процедура нормировки и учета отражений. Функциональная схема дана на рис. 4.

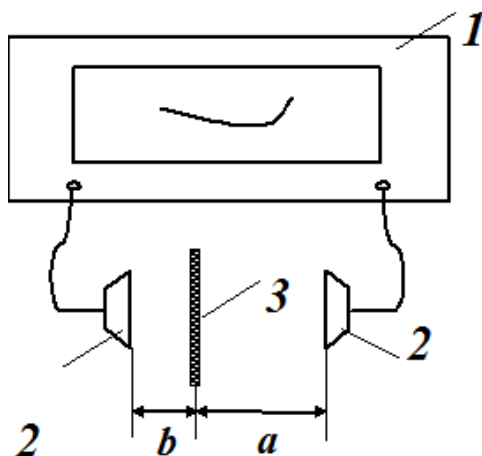


Рис.4. Функциональная схема установки для измерения коэффициента прохождения через образец РПМ в ближней зоне излучателя.

Согласование приемно-передающего блока 1 со свободным пространством осуществлялось через специальные тракты с излучателями 2 для работы в электрическом (рис. 3а) и магнитном (рис. 3б) полях соответственно. Измеряемый образец 3 помещался между излучателями 2 на расстоянии $a = 85\text{мм}$ от приёмного и $b = 5\text{мм}$ от передающего, что соответствует расположению излучателей в ближней зоне (см формулу 2).

3. Экспериментальные установки с расположением образцов РПМ в дальней зоне излучателя

Для измерения образцов в диапазоне частот 5.6...17.5 ГГц были реализованы три установки из автоматизированного измерительного комплекса на основе скалярных анализаторов цепей серии P2, работающие в условиях свободного пространства [5].

В состав комплекса входили следующие приборы и устройства:

- генераторные блоки и волноводные направленные ответвители падающей и отраженной волн со встроенными детекторами из трех комплектов панорамных измерителей КСВН Р2-59, Р2-61, Р2-67;

- 3 комплекта из двух плавных рупоров для каждого поддиапазона рабочих частот (разработка ИРЭ);

- 1 измерительный блок с подключенным для автоматизации процесса измерения устройством сопряжения на основе аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140;

- компьютер для сбора, обработки и вывода результатов в виде данных или графиков в реальном масштабе времени.

Величина коэффициентов прохождения электромагнитных волн через образцы РПМ измеряется по схеме с двумя плавными рупорными антеннами, имеющими малый собственный коэффициент отражения (-30 дБ).

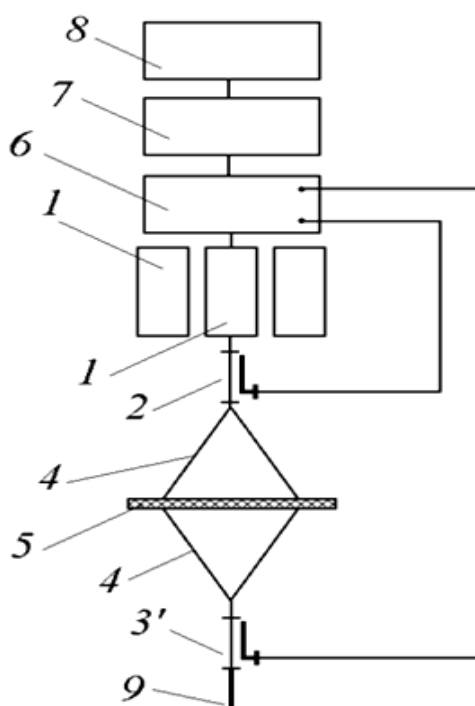


Рис.5. Функциональная схема комплекса для работы в режиме измерения коэффициента прохождения.

На рис. 5 приведена функциональная схема экспериментального комплекса, где 1 – генераторный блок; 2 – направленный ответвитель падающей волны; 3 – направленный ответвитель отраженной волны; 3' –

направленный ответвитель прошедшей волны; 4 – рупорная антенна; 5 – исследуемый образец; 6 – измерительный блок; 7 – АЦП; 8 – компьютер; 9 – согласованная нагрузка.

4. Объекты исследования

Объектами исследования являлись тонкие листовые РПМ, состоящие из диэлектрической подложки и поглощающего слоя толщиной 10мк, нанесенного методом напыления на подложку. Были изготовлены пять типов образцов. Для исследования в ближней и дальней зонах излучения образцы имели следующие размеры 100x100мм и 200x200мм соответственно. В качестве подложки применены полимерные плёнки с удельным сопротивлением $\rho = 10^{12}$ Ом·м и относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.2 \div 3.5$. Условно можно разделить все образцы РПМ на материалы с малым и большим поверхностным сопротивлением.

В таблице 1 представлены основные характеристики образцов.

Таблица 1.

Тип образца	Толщина образца d , мк	ρ_s , Ом на квадрат
1	60	500
2	70	400
3	60	7000
4	120	7000
5	300	40000

5. Результаты измерений

Результаты измерений частотных спектров коэффициентов прохождения электромагнитных волн через образцы РПМ в полях ближней и дальней зон излучения представлены на рис. 6 (а, б).

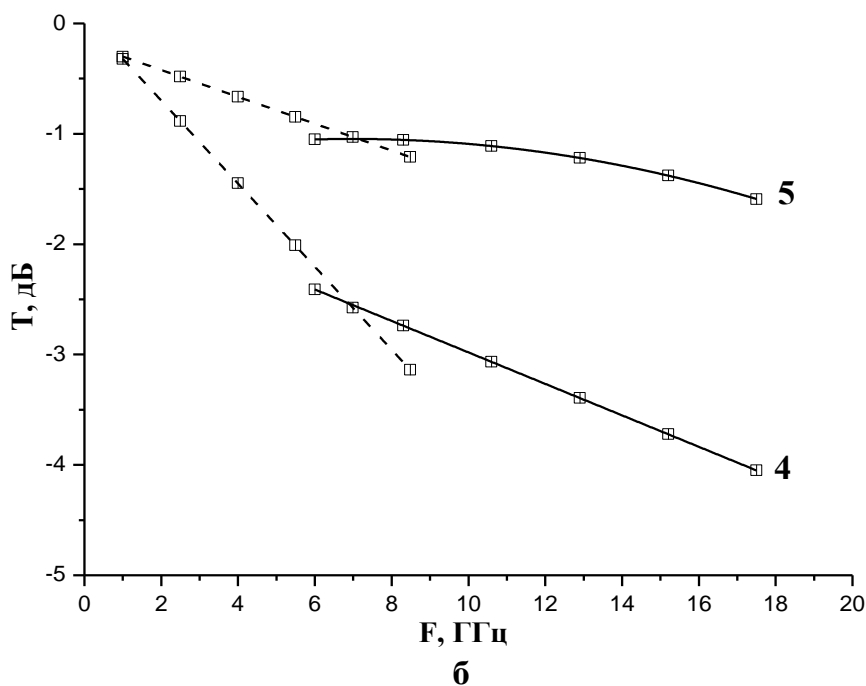
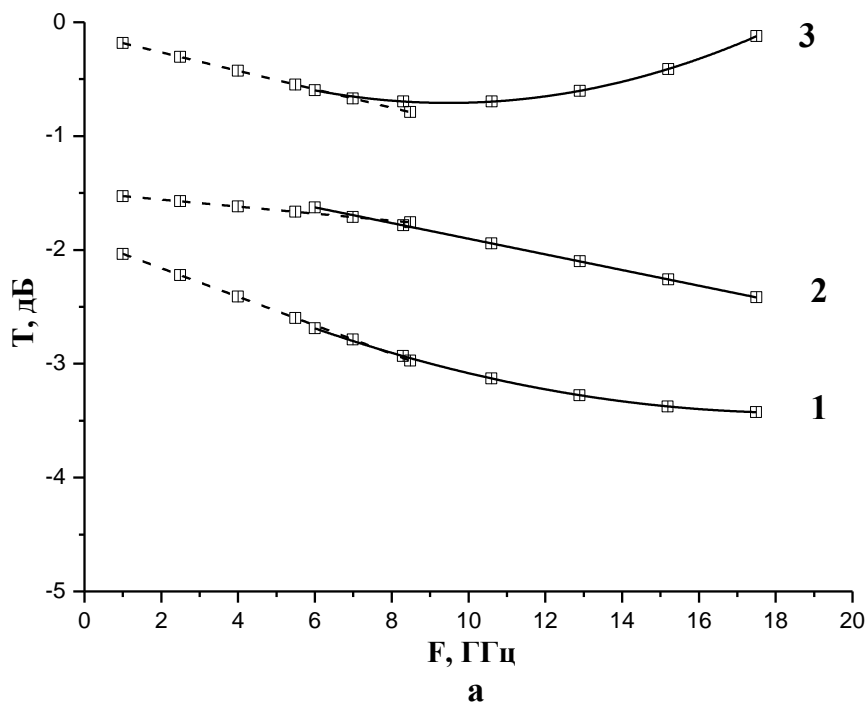


Рис.6 а, б. Частотные спектры коэффициентов прохождения образцов 1, 2 ,3 (а) и 4,5 (б). (Сплошная линия – измерения в дальней зоне излучения, штриховая линия – измерения в ближней зоне излучения, символом показан разброс экспериментальных данных от среднего уровня).

Несмотря на существенные отличия методик измерения и используемой аппаратуры, получены хорошие совпадения экспериментальных результатов в ближней и дальней зоне излучения (6...8.5 ГГц). Кроме тщательной процедуры измерений, в некоторой степени улучшению совпадения результатов измерения способствовало и то обстоятельство, что при фиксированном расстоянии между источником излучения и образцом, по мере приближения к высокочастотной части диапазона для ближней зоны излучения, согласно рис.1, поле стремится приобрести волновую структуру.

На рис. 7 а, б даны частотные спектры коэффициентов прохождения электромагнитного излучения для образцов РПМ, находящихся в электрическом и магнитном полях ближней зоны излучателя.

Для сравнения поведения РПМ в электрическом и магнитном полях ближней зоны излучения измерения были проведены в два этапа:

1. образец РПМ располагался в ближней зоне с излучателем в виде штыря, что обеспечивало величину полного волнового сопротивления значительно больше 377 Ом (рис. 3а);
2. образец РПМ располагался подобным же образом, но использовался излучатель в виде кольца, что обеспечивало величину полного волнового сопротивления значительно меньше 377 Ом (рис. 3б).

Из графиков видно, что с уменьшением поверхностного сопротивления коэффициенты прохождения как в электрическом, так и магнитном полях уменьшаются и имеют слабую частотную зависимость.

Образцы 1, 2, 3 (рис.7 а) имеют меньший коэффициент прохождения в магнитном поле, а 4 и 5 (рис.7 б), наоборот, в электрическом поле. Это распределение зависит от состава и толщины поглощающего слоя, например, у образцов 3 и 4 одинаковое поверхностное сопротивление, но разная толщина и различные наполнители.

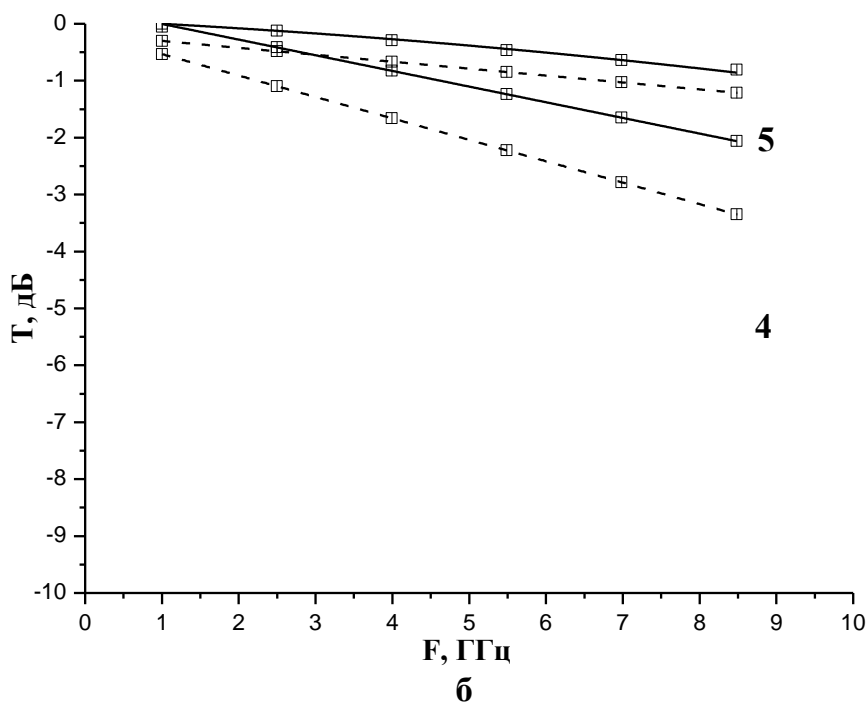
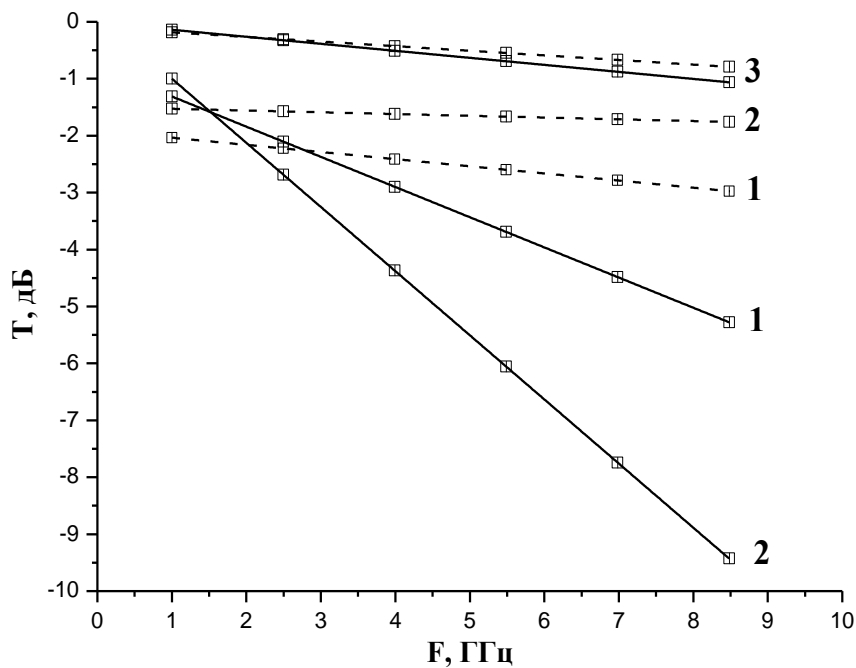


Рис.7 а, б. Частотные спектры коэффициентов прохождения образцов 1, 2, 3 (а) и 4,5 (б). (Сплошная линия – измерения в магнитном поле, штриховая линия – измерения в электрическом поле, символом показан разброс экспериментальных данных от среднего уровня).

Исключение составляет образец 2. Обладая поверхностным сопротивлением меньше, чем образец 1, он имеет больший коэффициент прохождения в электрическом поле и сильную частотную зависимость в магнитном поле. Это объясняется тем, что на поверхности полимерной пленки этого образца нанесены кроме проводящего слоя еще слой ферромагнетика.

Заключение

На основе известных формул сделана теоретическая оценка и практическая проверка работоспособности созданной экспериментальной базы для измерений в полях ближней зоны излучения. Проведено разделение измерений в электрическом и магнитном полях, для чего разработаны и созданы разные типы излучателей. Полученные экспериментальные характеристики РПМ в диапазоне частот 1...8.5 ГГц согласуются с предложенным модельным представлением.

На автоматизированном комплексе в дальней зоне излучения на частотах 5.6...17.5 ГГц исследованы те же образцы РПМ. В перекрываемом диапазоне частот измеренные характеристики подтверждают друг друга.

В результате, получена возможность экспресс - исследования тонких пленочных материалов небольших размеров в ближнем поле излучателя.

Литература

1. Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. *Антенны*. М.: Энергия, 1975, 528 с.
2. Е.А. Воробьев. *Экранирование СВЧ конструкций*. М.: Сов. Радио, 1979, 136 с.
3. А.Е. Башаринов, Л.Т. Тучков, В.М. Поляков и др. *Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ диапазоне*. М.: Сов. Радио, 1968, 390 с.
4. Г. Отт. *Методы подавления шумов и помех в электронных системах*. М.: Мир, 1979, 317 с.
5. Дьяконова О.А., Каленов Д.С., Казанцев Ю.Н. Автоматизированный измерительный комплекс на основе комплекта скалярных анализаторов

цепей. // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2016, N10,
Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/7/text.pdf>

Ссылка на статью:

С.В.Маречек, О.А Дьяконова. Методы и средства измерения для исследования пленочных материалов в ближней и дальней зонах излучения на сантиметровых волнах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/12/text.pdf>