

05;09;12

## Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне

© Б.М. Гарин, О.А. Дьяконова, Ю.Н. Казанцев

Институт радиотехники и электроники РАН,  
141120 Фрязино, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 9 сентября 1996 г. В окончательной редакции 5 декабря 1997 г.)

Изучены основные физико-механические характеристики резистивных нитей. Измерена зависимость комплексной диэлектрической проницаемости резистивной нити от длины волны в широкой области СВЧ диапазона. Показана возможность использования таких нитей в качестве основного элемента широкополосных радиопоглощающих структур.

### Введение

Необходимыми элементами многих изделий как в радиотехнике, так и других областях техники являются радиопоглощающие материалы и структуры [1–3]. Требуемые электродинамические и физико-механические характеристики этих материалов и структур определяются обычно конкретными условиями их применения.

Широкое распространение получили радиопоглощающие материалы и структуры на основе резистивных нитей, расположенных в диэлектрической матрице [4,5]. Особый интерес к таким материалам и структурам обусловлен возможностью плавного и контролируемого изменения их электродинамических и физико-механических характеристик за счет подбора толщины конструкции, геометрических размеров нитей, концентрации их в матрице, а также свойств частиц наполнителя в нити. В работе [6] дан обзор таких материалов, выпускаемых зарубежными фирмами. В [7] проводится анализ различных типов композиционных радиопоглощающих материалов на основе волокон из углерода, графита, бора, полиэтилена. Экспериментальные данные, представленные в [8], позволяют сравнить материалы с различными наполнителями по их способности поглощать и отражать электромагнитную энергию СВЧ диапазона, а также проанализировать влияние на их электродинамические свойства типа наполнителя, ориентации волокон и толщины материала. На практике оказывается, что лучшие из данных структур являются либо узкополосными при небольшой толщине и массе конструкции, либо имеют большую толщину и массу, работая в широком диапазоне длин волн.

Следует подчеркнуть, что к сведениям, приводимым по конкретной реализации радиопоглощающих материалов, нужно относиться критически. В основном подробная информация дается лишь об относительно толстых, тяжелых (различные поглотители электромагнитных волн для безэховых камер) и геометрически неоднородных (клинья и т. п.) конструкциях на основе композиционных радиопоглощающих материалов.

Из анализа литературы можно сделать некоторые выводы.

1. Описано большое количество структур на основе резистивных пленок и нитей, различающихся электродинамическими (рабочий диапазон, величина коэффициента отражения) и физико-механическими характеристиками (масса, толщина, гибкость).

2. Наиболее типичными и часто встречающимися поглощающими наполнителями для структур диэлектрического типа являются сажа, графит, углеродные волокна. В качестве связующих применяется широкий спектр материалов.

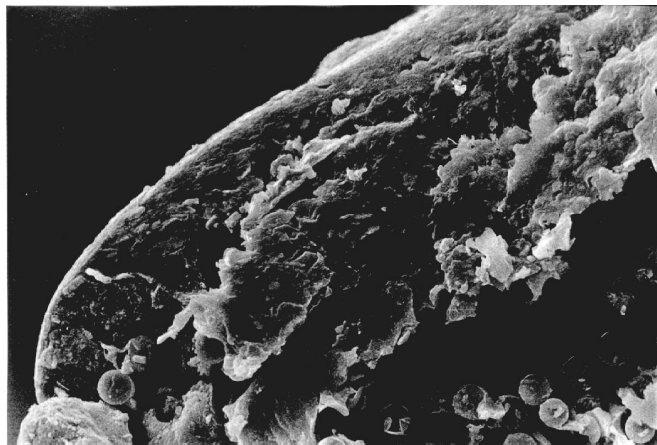
3. Имеются измерения комплексной диэлектрической проницаемости резистивных нитей в СВЧ на отдельных частотах, однако отсутствуют исследования спектров в широкой полосе частот.

4. Отсутствует описание широкополосных радиопоглощающих структур с малым коэффициентом отражения и достаточно хорошими физико-механическими свойствами.

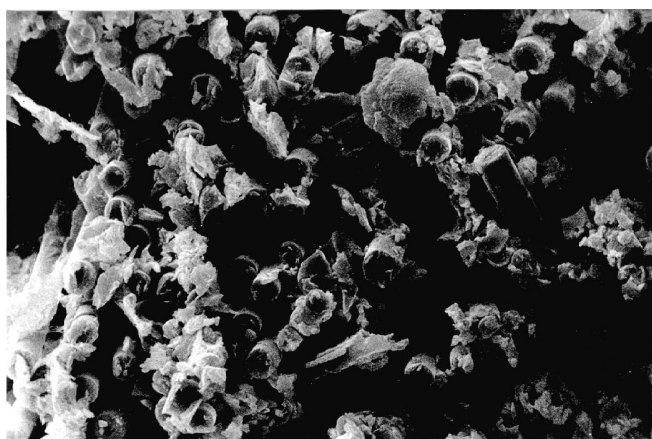
Поэтому задача создания новых структур на основе резистивных нитей актуальна и требует всестороннего изучения физических свойств как самих структур в целом, так и резистивной нити в отдельности. В настоящей работе представлены результаты исследований электродинамических, электрических и физико-механических свойств электропроводящих стеклонитей, а также приведены расчетные характеристики моделей структур на основе таких нитей.

### Структура, физико-механические и электрические свойства резистивных нитей

Основным радиопоглощающим элементом для новых широкополосных структур [9,10] выбрана резистивная нить. Резистивная нить представляет собой многокомпонентное волокно, в объеме которого сформирован электропроводящий композит. Проводящим наполнителем является сажа с частицами размером порядка 300–600 Å. Эти частицы содержат кристаллиты графита. В связи с этим такие нити относятся к широкому классу углеграфитовых тел [11], однако они обладают специфическими свойствами ввиду особого строения материала — волокна.



**Рис. 1.** Часть поперечного среза электропроводящей стеклонити.



**Рис. 2.** Группа стекловолокон с сажой внутри электропроводящей стеклонити.

На рис. 1, 2 приведена электропроводящая нить, выполненная с помощью электронного микроскопа. На рис. 1 приведена часть поперечного среза нити, где хорошо видна защитная полимерная оболочка и размещенные внутри нее стекловолокна с сажой. Рис. 2 иллюстрирует тот же срез нити с более сильным увеличением. Стекловолоконна в такой нити размещены хаотично с относительным объемом свободного межволоконного пространства 30% и образуют неоднородную структуру. Введение наполнителя в объем нити является сложным процессом, и поэтому реальная резистивная нить представляет собой комбинацию цепочечных, плоских или объемных структур [12]. Этим объясняется неоднородность резистивной нити и, как следствие, разброс ее параметров. Оболочка нити обладает хорошими прочностными, влагоустойчивыми и температурными характеристиками.

Исследуемая в работе нить в целом является проводящей средой. Кроме того, пространственные размеры неоднородностей много меньше длины волны рабочего диапазона. Это позволяет в дальнейшем описывать резистивную нить в виде сплошной среды с эффек-

тивной удельной электропроводностью и эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью. Ниже эту среду мы будем называть материалом нити.

Сама нить может характеризоваться рядом других эффективных параметров. Приведем некоторые основные эффективные параметры исследованной реальной резистивной нити, которые будут использованы в дальнейших расчетах.

Методом гидростатического взвешивания [13] были определены следующие значения: линейная плотность  $1.187 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}$ , объемная плотность  $1.27 \text{ g/cm}^3$ . Важными электрическими параметрами, характеризующими реальную резистивную нить, является усредненное сопротивление резистивной нити на единицу длины и усредненная удельная электропроводность материала нити, измеренные на постоянном токе. Усредненное удельное сопротивление было определено из измерений усредненной удельной электропроводности четырехзондовым методом, описанным в работе [14]. Присоединение измерительных электродов осуществлялось при помощи серебросодержащего клея фирмы "FUZJKURA KASEL CO, LTD" с удельной электропроводностью  $10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Экспериментальная установка для измерения удельного сопротивления различных проводящих материалов и сред использовала стандартные цифровые измерительные приборы: ампервольтметр ЦЧ-300, вольтметр В7-27А/1 и стабилизированный источник питания. Основная погрешность измерения удельного сопротивления резистивной нити возникала при определении геометрических размеров и составляла 5%.

Для исследованной в работе резистивной нити измеренное усредненное сопротивление на единицу длины составляет  $3.7 \cdot 10^3 \Omega/\text{cm}$ , а усредненная удельная электропроводность материала нити  $\sigma = 2.9 \cdot 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Однако характеристики нити на постоянном токе не могут достаточно полно определить ее поглощающие свойства на СВЧ. Более полной характеристикой поглощающих свойств нити является ее комплексная диэлектрическая проницаемость, которая и является основным предметом исследования в настоящей работе.

## Электродинамические характеристики резистивных нитей

В работе была детально изучена комплексная диэлектрическая проницаемость материала нити в диапазоне длин волн 0.25–15 см. Для различных интервалов длин волн использовался какой-либо из трех следующих методов измерения: резонаторный, волноводный, метод свободного пространства.

При резонаторном методе исследуемый образец в виде отрезка резистивной нити помещался в пучность электрического поля [15]. Серия измерительных установок была собрана на базе панорамных измерителей коэффициента стоячих волн, перекрывающих миллиметровый и сантиметровой диапазоны длин волн. Ка-

ждый из измерительных резонаторов представлял собой отрезок прямоугольного волновода, подсоединенный к основному волноводу через диафрагму, обеспечивающую необходимую связь и соответственно высокую добротность резонатора. Исследуемая резистивная нить была помещена вдоль силовых линий электрического поля на расстоянии  $\lambda/4$  от торца через щель, прорезанную в широкой стенке волновода ( $\lambda$  — длина волны). Комплексная диэлектрическая проницаемость нити определена из измеренных значений резонансных частот и коэффициентов отражения на резонансных частотах для пустого резонатора и резонатора с образцом. Основная погрешность измерения комплексной диэлектрической проницаемости была обусловлена погрешностью при определении объема исследуемого образца резистивной нити и составляла 20%.

С целью повышения надежности результатов в работе был также применен метод определения комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  по измеренным коэффициентам прохождения и отражения электромагнитной волны от слоя, состоящего из плотно соприкасающихся резистивных нитей. Измерение коэффициентов отражения и прохождения произведено на трех типах установок миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, выполненных на основе панорамных измерителей коэффициента стоячих волн: в первом типе использовалась рупорная методика [16,17] измерения коэффициента отражения и коэффициента прохождения (с двумя одинаковыми рупорами) в свободном пространстве при нормальном падении электромагнитной волны на исследуемый образец; во втором типе применена методика измерения коэффициентов отражения и прохождения в волноводе [18], т.е. при падении электромагнитной волны на исследуемый образец под некоторым углом; в третьем типе установок использована методика измерения коэффициентов отражения и прохождения в свободном пространстве с помощью волноводного интерферометра миллиметрового диапазона длин волн [19,20].

На рис. 3, 4 приведены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости резистивной нити от длины волны. Крестиками представлен экспериментальный результат усреднения многочисленных измерений различными методами. Полученные результаты измерения аппроксимированы линейными зависимостями от длины волны. Действительная часть  $\epsilon'$  диэлектрической проницаемости относительно слабо зависит от длины волны (с ростом длины волны  $\epsilon'$  увеличивается в интервале значений 39...47); мнимая часть  $\epsilon''$  возрастает пропорционально длине волны (при этом с увеличением длины волны  $\epsilon''$  увеличивается в пределах значений от 5 до 310). Зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от длины волны соответствует теории диэлектрических потерь в среде с постоянной (не зависящей от частоты) удельной электропроводностью на переменном токе  $\sigma_1$ , связанной со свободными носителями заряда. Согласно этой теории [21],  $\epsilon'' = \sigma_1 / (\epsilon_0 \omega)$  при частотах  $\omega \ll \tau^{-1}$ , где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\tau$  — сред-

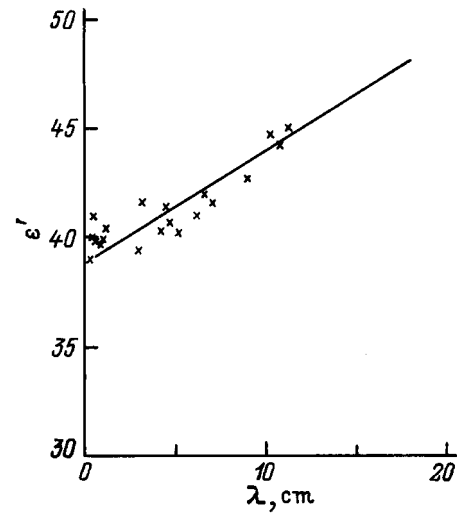


Рис. 3. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости электропроводящей стеклонити от длины волны.

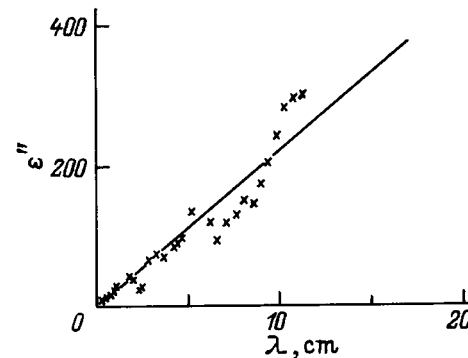


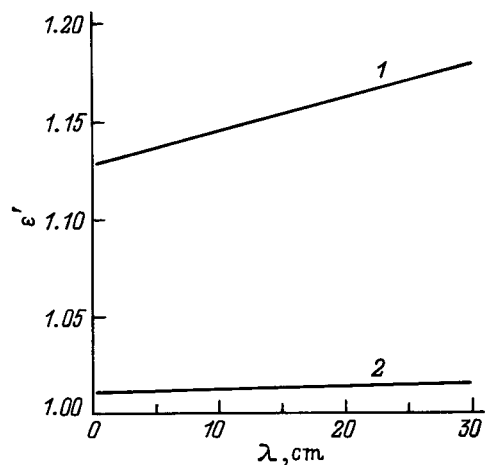
Рис. 4. Зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости электропроводящей стеклонити от длины волны.

нее время релаксации свободных носителей заряда по импульсу ( $\tau \sim 10^{-13}$  s). Наблюдаемые потери соответствуют расчетной эффективной удельной электропроводности материала нити  $\sigma_1 = 3.7 \cdot 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Данная электропроводность несколько превышает величину  $\sigma$ , найденную из измерений на постоянном токе (см. выше), однако отличается от нее незначительно. Таким образом, основной вклад в потери обусловлен проводимостью сажи с кристаллитами графита, содержащейся в нити. Некоторое превышение  $\sigma_1$  над  $\sigma$  может быть связано с вкладом в электропроводность на переменном токе изолированных проводящих зерен графита и сажи, не находящихся между собой в электрическом контакте, а также с разбросом параметров нити и погрешностями измерений. Отметим также, что вклад свободных носителей заряда в действительную часть диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_e \simeq -(1 - \omega^2 \tau^2) \tau \sigma_1 / \epsilon_0$  [21] не зависит от длины волны в первом приближении по малому параметру  $\omega \tau$ , а во втором приближении уменьшается с увеличением длины волны на пренебрежимо малую

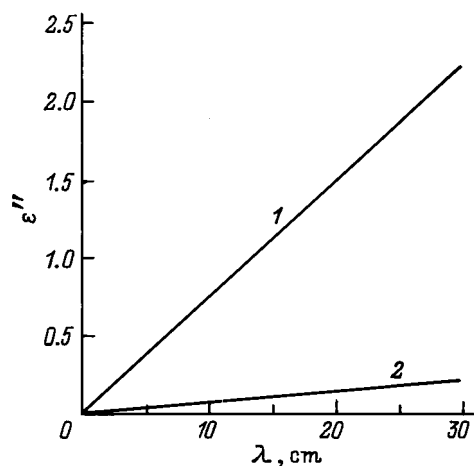
величину (во всем рассматриваемом диапазоне). Поэтому он не может объяснить наблюдаемое возрастание полной величины  $\epsilon'$  с длиной волны. С другой стороны, это возрастание  $\epsilon'$  соответствует вкладу дипольной релаксации дебаевского типа, которая, как правило, является основной причиной дисперсии диэлектрической проницаемости в неупорядоченных материалах в данном диапазоне [22–24]. В эту релаксацию вносят вклад различные молекулярные группы в аморфных областях нити.

## Структуры на основе резистивных нитей

На основе данных, полученных для резистивных нитей, проведены расчеты эффективной комплексной диэлектрической проницаемости различных радиопоглощающих слоев по методике, предложенной в работе [25].



**Рис. 5.** Зависимости действительной части диэлектрической проницаемости слоев эффективных сред от длины волны: 1 —  $d/a = 17.7$ , 2 —  $58.8$ .



**Рис. 6.** Зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости слоев эффективных сред от длины волны (1, 2 — то же, что и на рис. 5).

В качестве наглядной иллюстрации на рис. 5, 6 приведены результаты расчета слоев различных сред с эффективными параметрами, которые входят в дальнейшем в расчет реальных однослойных и двухслойных структур [9,10]. Зависимости действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей диэлектрической проницаемости слоев от длины волны даны для различных значений отношения  $d/a$ . Параметр  $d/a$  характеризует объемное содержание резистивных нитей в диэлектрической среде и определяется следующим образом:  $d/a = (3\pi V_d)^{1/2} (V_{th})^{1/2}$ , где  $d$  — расстояние между нитями,  $a$  — радиус нити,  $V_d$  — объем диэлектрика,  $V_{th}$  — объем вещества нитей. Анализируя поведение зависимостей во всем диапазоне длин волн, можно заметить, что уменьшение отношения  $d/a$ , т.е. увеличение объемного содержания нитей в слое, приводит к увеличению действительной и мнимой частей его диэлектрической проницаемости.

## Заключение

Детально исследована комплексная диэлектрическая проницаемость электропроводящей стеклонити и измерен ее спектр в широкой области длин волн СВЧ диапазона (0.25–15 см).

## Список литературы

- [1] Шнейдерман Я.А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. № 2. С. 3–21.
- [2] Шнейдерман Я.А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. № 3. С. 3–15.
- [3] Торгованов В.А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1974. № 12. С. 51–75.
- [4] Айзикович Б.Б., Алексеев А.Г., Ирумов В.С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С. 2–6.
- [5] Алимин Б.Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 2. С. 75–82.
- [6] Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. Электрические свойства полимерных композитов с электропроводящими дисперсными и волокнистыми наполнителями. Сер. Общественные вопросы. № 1. М.: Обзорная информация, 1984. 55 с.
- [7] Jefferson F., Lindsey I. // Intern. Symp. Digest Antennas and Propagation. Philadelphia, 1986. Vol. 1. P. 113–120.
- [8] Myazakiy, Tominaga S. // IEEE Intern. Symp. Electromagn. Compat. Arlington, 1983. P. 101–116.
- [9] Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Патент РФ № 2037926. МПК H01Q 17/00.
- [10] Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Патент РФ № 2037931. МПК H01Q 17/00.
- [11] Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 240 с.
- [12] Электрофизические свойства перколяционных систем / Под ред. А.Н. Лагарькова. М.: ИВТАН, 1990. 120 с.
- [13] Плаченов Т.Г., Колосенцев С.Д. // Параметрия. Л.: Химия, 1988. 174 с.
- [14] Blythe A.R. // Polymer Testing. 1984. N 4. P. 195–209.

- [15] *Аплеталин В.Н., Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А.* и др. // Тез. докл. НТК "Радиотехнические измерения в диапазонах ВЧ и СВЧ". Новосибирск, 1984. С. 21–22.
- [16] *Аплеталин В.Н., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н.* и др. // Измерительная техника. 1991. № 7. С. 40–43.
- [17] *Аплеталин В.Н., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н.* и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. НТК "Методы и средства измерений электромагнитных характеристик материалов на ВЧ и СВЧ". Новосибирск, 1991. С. 132–134.
- [18] *Аплеталин В.Н., Зубов А.С., Казанцев Ю.Н.* и др. А.С. № 1741083 СССР.
- [19] *Apletalin V.N., Dyakonova O.A., Kazantsev Y.N.* et al. // Proc. of 3<sup>d</sup> Intern. Conf. on Electromagnetics in Aerospace Applications and 7<sup>th</sup> European Conf. on Electromagnetic Structures. Torino (Italy), 1993. P. 253–257.
- [20] *Apletalin V.N., Dyakonova O.A., Kazantsev Y.N.* et al. // Proc. of 23<sup>d</sup> European Microwave Conf. Madrid, 1993. P. 308–312.
- [21] *Блатт Ф.* Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир, 1971. 470 с.
- [22] *Фрелих Г.* Теория диэлектриков. М.: ИЛ, 1960. 246 с.
- [23] *Рез И.С., Поплавко Ю.М.* Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
- [24] Электрические свойства полимеров / Под ред. Б.И. Сажина. Л.: Химия, 1986. 224 с.
- [25] *Дьяконова О.А.* Автореф. канд. дис. М.: ИРЭ РАН, 1995. 19 с.