

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОЗДАНИЯ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

**В.И.Пономаренко, доктор физико-математических наук, профессор,
В.Н.Бержанский, доктор физико-математических наук, профессор, член-корр. КАН,
А.С.Хлыстов, доктор физико-математических наук, профессор, А.М.Тимошенко**

Поглотители электромагнитных волн (ПЭВ) применяются в различных областях техники, связанных со сверхвысокими частотами, и используются для радиолокационной маскировки объектов, облицовки изнутри безэховых камер и колпаков для излучающих антенн, снижения нежелательных излучений и отражений от объектов и оборудования, биологической защиты персонала от излучений.

Многообразие областей и условий использования ПЭВ соответствует многообразию требований к их характеристикам - радиотехническим параметрам, толщине, весу, негорючести, прочности, гибкости, теплофизическим свойствам, нетоксичности и т.д.

В качестве материалов для ПЭВ находят применение как радиопоглощающие материалы - ферриты, металлические и графитовые порошки и волокна, проводящие пленки, так и непоглощающие материалы - пенопласт, различные герметики, стеклянные микросферы и т.д. Широко применяются искусственные диэлектрики, называемые также композиционными материалами, представляющие собой макроскопически неоднородные среды с характерным размером неоднородностей, малым по сравнению с длиной волны.

Применяются различные конструкции поглотителей резонансного типа, с постепенным переходом, комбинированные поглотители.

В Симферопольском университете работы, связанные с созданием радиофизической теории, технологией изготовления и методов измерения параметров радиопоглощающих материалов и структур, ведутся с 1972 г. Охарактеризуем кратко основные из полученных результатов.

В области искусственных сред:

- построена теория взаимодействия полупроводниковых ленточных решеток с квазистатическим полем [1], на основе которой впервые были исследованы дисперсионные характеристики новых типов композиционных материалов из проводящих волокон и чешуек, в том числе аморфных микропроводов, а также ячеистых материалов;

- теоретически и экспериментально исследованы композиционные материалы на основе металлизированных включений [2], в том числе частиц ферритового порошка; обоснована возможность получения искусственных диа- и парамагнетиков из немагнитных материалов.

В области плоскостойких согласованных структур:

- разработаны методы расчета согласованных параметров и оптимизации частотных характеристик плоскостойких и градиентных структур [3], на основе которых были спроектированы и созданы высокоэффективные ПЭВ;

- построена общая теория многослойных магнитогиротропных покрытий с расположением осей легкого намагничивания параллельно и нормально к плоскости слоев [4];

- разработана теория ПЭВ с резистивно-емкостной пленкой [5], что позволило спроектировать и создать широкополосные покрытия миллиметрового диапазона с недостижимым ранее уровнем поглощения падающей волны.

В области неплоских радиопоглощающих структур:

- всесторонне исследован эффект рассогласовывающего влияния зазоров между элементами ферритовой керамики [6], разработана теория комбинированного феррито-диэлектрического поглотителя, что позволило создать сверхширокополосный ПЭВ для безэховых камер, превосходящий по своим параметрам зарубежные аналоги;

- обоснованы конструкции поглотителей периодического типа на основе ленточных, клиновидных и пирамидальных элементов; разработан вариант проекционного метода решения задач рассеяния на периодических структурах, позволяющий проводить точные расчеты их радиопоглощающих характеристик [7].

В области технологии материалов и покрытий разработаны:

- новая технология получения стронций-алюминиевых ферритовых порошков с высокой магнитной проницаемостью [8];

- метод нанесения магнитных и немагнитных металлических пленок на частицы ферритовых порошков [9];

- технология получения тонких проводящих пленок с равномерным поверхностным сопротивлением на поверхности композиционного слоя, содержащего стеклянные микросферы [10].

В области измерения электромагнитных параметров материалов разработаны:

- волновой метод измерения магнитной проницаемости аморфных микропроводов [11];

- методика восстановления компонент тензора магнитной проницаемости магнитогиротропной пластины по результатам волноводных измерений [12];

- автоматизированная установка для точного измерения сверхвысокочастотных констант материалов резонаторным методом [13].

Результаты исследований, полученные в Симферопольском университете, отражены во многих опубликованных научных статьях и защищены свидетельствами на изобретения, а также внедрены в практику.

Возрастание требований к радиотехническим характеристикам поглотителей, их весу, толщине и т.д. требует создания новых типов поглотителей и материалов для них. На наш взгляд, к актуальным проблемам относятся следующие:

- распространение теории эффективности среды на искусственные диэлектрики с частичным упорядочением частиц-включений;

- исследование квазипарамагнитного эффекта в сложных композитах на основе металлизированных включений с высокой диэлектрической проницаемостью;

- исследование нового типа композиционных материалов на основе интеркалированных порошков цеолитов и силикагелей.

Кратко поясним суть указанных проблем.

Для расчета эффективной диэлектрической (магнитной) проницаемости среды с диэлектрической проницаемостью, содержащей сферические включения с диэлектрической проницаемостью, применяется обычно формула Максвелла-Гарнетта

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \left[1 + 3C \left(\frac{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} - C \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

или формула Браггемана

$$C \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon} + (1 - C) \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon} = 0, \quad (2)$$

где C - объемная концентрация включений. Формула (1) выводится в предположении, что частица типа "2" в смеси окружена средой типа "1" (матрицей). Такая предпосылка наиболее адекватна случаю, когда частицы типа "2" образуют правильную решетку. Формула (2) получается в предположении, что частица типа "2" в смеси окружена средой с искомой усредненной диэлектрической проницаемостью (принцип самосогласованного поля). Эта предпосылка означает, что в непосредственной близости к отдельной частице типа "2" могут находиться другие частицы этого типа. Такая ситуация имеет место в идеальной смеси частиц двух типов.

Применительно к среде, состоящей из матрицы и включений, указанное предположение наиболее адекватно случаю, когда частицы-включения распределены в матрице не упорядоченно, а хаотически.

Итак, формулы (1) и (2) можно рассматривать как описывающие два крайних случая характера распределения частиц-включений в матрице. В реальных смесях, однако, нет ни абсолютной упорядоченности, ни полного хаоса в распределении включений по объему матрицы. Например, при обычном способе изготовления композиционного материала путем смешивания твердых частиц с жидкой матрицей вязкая жидкость может "укутывать" отдельные частицы слоем некоторой толщины, препятствующим соприкосновению соседних частиц. Таким образом, теория, адекватно описывающая реальные смеси, должна содержать параметр, учитывающий степень их упорядочения.

В высокочастотном электромагнитном поле неоднородная среда, содержащая немагнитные проводящие включения, может иметь отличную от единицы эффективную магнитную проницаемость, то есть, являться искусственным магнетиком, что связано с возникновением внутри включений вихревых токов. Частота "квазимагнитного резонанса" зависит от проводимости и размеров частиц-включений и может быть подобрана соответствующим образом, что делает искусственные магнетики перспективными материалами для техники сверхвысоких частот, в частности, в качестве радиопоглотителей. Однако реальные модели искусственных магнетиков, такие, как структуры с кольцевыми токами, металлизированные микросферы, обладают такими недостатками, как поляризационная зависимость магнитной проницаемости и сложность изготовления. Так, для получения искусственного парамагнетика частицы-включения должны быть покрыты пленкой с комплексным поверхностным сопротивлением резистивно-емкостного характера. Такое сопротивление достигается, например, при островковом строении пленки, обеспечение которого связано с определенными технологическими трудностями. Однако, эффект может возникнуть и в том случае, если частицы-включения покрыты сплошной резистивной пленкой, но обладают высокой комплексной диэлектрической проницаемостью. Этим свойствам могут удовлетворять, например, порошки сегнетоэлектрических солей. Создание такого искусственного магнитного материала является комплексной проблемой, включающей теоретический, технологический и измерительный аспекты.

Цеолиты, как естественные, так и искусственные, представляют собой большую группу каркасных алюмосиликатов. Остов их структуры рыхлый, до 50% его объема составляют полости и каналы. Внутренние каналы и поры в зернах цеолита могут быть заполнены, например, радиопоглощающей жидкостью, после чего путем смешивания частиц цеолита со связующим получается искусственный диэлектрик (композит).

Исследование дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ композита на основе порошка цеолита-клиноптилолита, содержащего внутри себя раствор поваренной соли в воде, было проведено экспериментально в диапазоне частот 8,2 - 11,2 ГГц. В качестве связующего использовалась эпоксидная смола, которая также выполняла функцию герметика, изолируя воду внутри зерен цеолита от атмосферы. Размеры цеолитовых зерен составляли 0,05 - 0,1 мм. Объемная концентрация цеолита, определяемая как отношение объема, занимаемого порошком цеолита до его помещения в полимерную матрицу, к объему композита после отвердевания эпоксидной смолы, близка к 40%. Измерения и проводились резонаторным методом на установке, описанной в [13]. Измерения ϵ' и ϵ'' показали, что в зависимости от содержания воды и соли в образцах, их комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ может варьироваться в широких пределах:

$$3 \leq \epsilon' \leq 15, \quad 0,3 \leq \epsilon'' \leq 13$$

Возможность варьирования компонент диэлектрической проницаемости композита обеспечивает его использование в радиопоглощающих структурах, например, в качестве материала для согласующего слоя.

По мнению авторов, представляет интерес исследование свойств композитов на основе частиц цеолита и силикагеля, во внутренних каналах которых осаждена металлическая пленка. Такой композит может обеспечить еще более широкий диапазон варьирования диэлектрической проницаемости по сравнению с композитом, содержащим электролит. Кроме того, наличие внутри зерен цеолита множества проводящих контуров указывает на возможность получения квазимагнитного эффекта.

Исследования по указанным перспективным направлениям проводятся в настоящее время на кафедре экспериментальной физики Симферопольского университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко В.И. Проводящая ленточная решетка в квазистатическом поле. // Изв.вузов. Электромеханика. - 1982. - N 5. - С. 518 - 523.
2. Пономаренко В.И., Мирвицкий Д.И. Искусственный диэлектрик с металлизированными магнитодиэлектрическими включениями. // Радиотехника. - 1991. - N 46. - С. 76 - 78.
3. Хлыстов А.С., Тимошенко А.М. Определение диапазонности однослойных ферритовых поглотителей электромагнитных волн по спектру магнитной проницаемости.// Изв. вузов. Физика. - 1987. - N 11. - С. 69 - 73.
4. Пономаренко В.И., Бержанский В.Н., Мирвицкий Д.И. Поглощение электромагнитных волн тонкими многослойными магнитогиротропными структурами.// Радиотехника и электроника. - 1986. - N 11. - С. 2275 - 2276.
5. Пономаренко В.И., Куприянов И.К.; Журавлев С.И. Неотражающая структура на основе резистивной пленки с малой емкостной компонентой проводимости.// Радиотехника и электроника. - 1992. - N 2. - С. 346 - 349.
6. Хлыстов А.С., Пономаренко В.И., Титенко А.Г., Ключай И.Ф. Влияние зазоров между элементами ферритового радиопоглощающего покрытия метрового диапазона на величину коэффициента отражения.// Специальная радиоэлектроника. - 1977. - Вып. 5-6. - С. 56 - 58.
7. Пономаренко В.И., Стадник И.П. Расчет коэффициента отражения электромагнитных волн от клиновидной радиопоглощающей структуры. // Изв. вузов.Электромеханика.-1986.-N 4.-С.9-15.
8. А.с. 1672532 от 23.08.91. Бюл. N 31 (СССР). Ферритовый материал / Агафонов М.В., Бержанский В.Н., Покусин Д.Н.
9. А.с. 1709401 от 1 окт. 1991.(СССР). Композиционный поглощающий материал./ Бержанский В.Н., Пономаренко В.И., Першина Е.Д., Фаерман М.Д.
10. А.с. 1632318 от 29 мая 1989 (СССР). Поглотитель электромагнитных волн./ Пономаренко В.И., Куприянов И.К.
11. Пономаренко В.И., Бержанский В.Н., Дзедолик И.В., Кокос В.Л., Васильев Ю.М., Торкунов А.В. Волноводный метод измерения магнитной проницаемости металлов на СВЧ.// Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1989. - N 3. - С. 38 - 40.
12. Пономаренко В.И., Васильев Ю.М. Обратная задача рассеяния в прямоугольном волноводе с магнитогиротропной пластиной.// Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1989. - N 1. - С. 76 - 78.
13. Бержанский В.Н., Васильев Ю.М., Пономаренко В.И. Автоматизированный измерительный комплекс на основе усовершенствованного панорамного измерителя КСВН и напряжения типа P2 - 61.// Методы и средства измерений электромагнитных характеристик материалов на ВЧ и СВЧ: тезисы докл. VI Всесоюзной науч.-техн. конф. - Новосибирск, 1988. - С. 187.