

ЗАЩИТНЫЕ ЭКРАНЫ И ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько
Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
Украина

Поступила в редакцию 12.06.2003

Рассмотрены основные принципы защиты разнообразных объектов от влияния СВЧ излучений на основе экранирования и использования радиопоглощающих материалов. Приведен обзор разнообразных типов защитных экранов, конструкций и материалов, которые применяются для их изготовления. Рассмотрены электромагнитные свойства радиопоглощающих материалов и сред, в том числе композитных и киральных, и физические принципы их функционирования.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) различной природы на технические и биологические объекты является существенным фактором, влияющим на их функционирование. Поскольку в настоящее время значительно возросло количество разнообразных источников ЭМИ (информационные системы, системы связи, навигации и др.) и расширяется используемый частотный диапазон, то весьма актуальными являются проблемы защиты от воздействия электромагнитных сигналов в широкой полосе частот. Наряду с техническими аспектами этих вопросов существуют и иные, в частности, экологические аспекты, которые в ряде случаев являются определяющими.

Разработка систем защиты, экранирования и поглощения широкополосного ЭМИ является довольно сложной задачей как с теоретической, так и с практической точки зрения. Жесткие технические требования к таким системам обуславливают необходимость поиска комплексных решений задачи защиты от ЭМИ, а также защиты информации, содержащейся в ЭМИ [1, 2]. Такие решения включают в себя использование не только специальных материалов и покрытий, но и элементов конструкций (строительных или технических), учет электродинамических свойств окружающей среды и т.д. Например, в табл. 1 приведены защитные свойства различных строительных материалов [3].

Правильный учет распространения и распределения радиоволн дает возможность использовать защитные свойства таких элементов конструкций. Необходимость дополнительного экранирования должна быть обоснована и рассмотрена только после того, как исчерпаны конструктивные рекомендации по оптимальной компоновке. Следует отметить, что электромагнитный экран одновременно с выполнением основной функции перераспределяет электромагнитное поле внутри объекта.

Таблица 1

Защитные свойства различных строительных материалов в дБ

Материалы и конструкции	Сантиметровый диапазон	Метровый диапазон
Капитальная кирпичная стена толщиной 70 см	20	12
Внутренняя оштукатуренная переборка из одного слоя сосновых досок толщиной 30 мм	10 ÷ 12	2,5
Деревянная переборка из одного слоя сосновых досок толщиной 30 мм	1 ÷ 2,5	1 ÷ 2,5
Оконное стекло толщиной 3 мм	1 ÷ 3	–
Окно с целой одинарной рамой	4,5	3
Окно с двойной рамой	7	3,5

В данном обзоре основное внимание уделено таким базовым компонентам систем защиты от ЭМИ, как экраны и поглотители. Многообразие материалов и конструкций для этих элементов приводит к необходимости определения целесообразности применения тех или иных устройств для решения конкретных задач.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭКРАНЫ

При разработке дифракционных экранов приходится учитывать, по крайней мере, три фактора: уровень отражения, сквозное затухание, обусловленное проникновением энергии сквозь материал экрана и наличие боковых дифракционных связей (при ограниченной длине экрана). Кроме того, необходим учет влияния отдельно расположенных больших радиоотражающих поверхностей и одиночных излучателей, в некоторых случаях увеличивающих уровень поля в глубокой тени. Решение этих задач может быть проведено с использованием как теоретических, так и экспериментальных методов. Применение достаточно точных математических моделей при выборе

методов защиты позволяет существенно сократить затрачиваемые время и средства при обеспечении необходимого уровня защиты. Из приведенных в [4] данных следует, что для экранировки СВЧ излучения очень важно иметь высокую электропроводность используемых материалов, однако это свойство трудно совместить с прозрачностью для видимого света.

Сквозное затухание материала может быть определено несколькими путями. Из приведенных в [5] формул видно, что поглощение в металлическом экране увеличивается с ростом частоты поля, толщины, магнитной проницаемости и проводимости металла экрана, а отражение, в основном определяется несоответствием волновых сопротивлений свободного пространства и металла. На рис. 1 приведены зависимости экран-

металлические сетки, обладающие достаточным ослаблением, но отличающиеся от листовых материалов меньшим весом и стоимостью.

При малых толщинах металлические пленки обнаруживают ряд интересных свойств, как, например, почти полное сохранение идеальной отражательной способности в радиодиапазоне при толщине, много меньшей толщины скин-слоя, соответствующего частоте падающей волны. Нанесение тонких проводящих прозрачных пленок (в частности, двуокиси олова) позволяет получить защитное стекло с ослаблением СВЧ поля около 30 дБ [3]. Параметры структуры с учетом проводимости и толщины пленок золота, напыленной на стекло, анализируются в работе [6]. Характеристики тонких металлических пленок существенно отличаются от характеристик больших

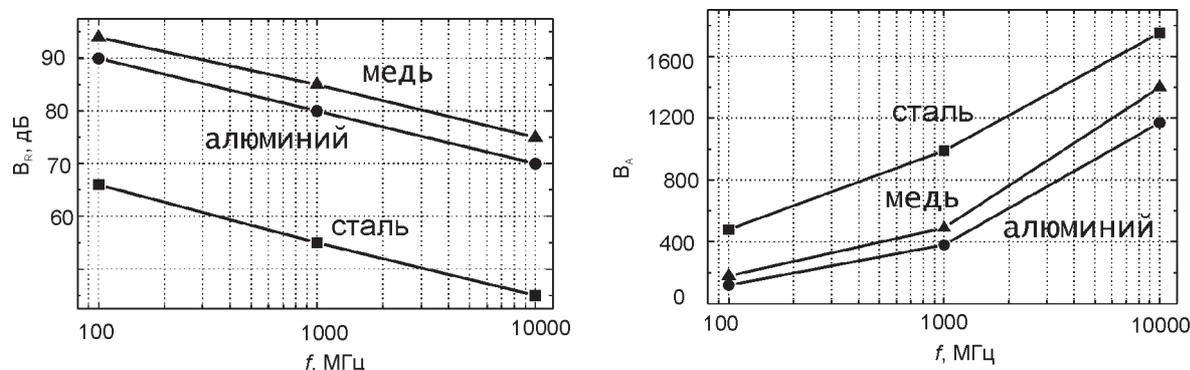


Рис. 1. Частотные зависимости энергетических коэффициентов отражения и поглощения сигналов для различных металлов (толщина листа 0,05мм).

ного ослабления различных металлических листов от частоты. При расчете затухания сплошных металлических листов (применяемых довольно редко) приходится учитывать не затухание чистого листа, а затухание листа в конструкции, т.е. с учетом элементов крепления, стыков и т.д. Затухание таких экранов лучше определять экспериментально. Для эффективной защиты необходимо, чтобы кромка экрана была выше оптической оси источник – кромка облучаемого объекта. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости дифракционного затухания от интегрального безразмерного параметра ν , определяемого через расстояния от экрана до источника и облучаемого объекта (R_1 и R_2), длину волны λ и расстояние H_0 между краем экрана и оптической осью источник – кромка облучаемого объекта.

Как видно из рис. 2, сплошные металлические листы имеют очень большое затухание, что на практике не требуется. Поэтому для защиты целесообразно использовать тонкие или перфорированные листы, проводящие пленки или

объемов металла [7 – 9]. Это связано с тем, что длина свободного пробега электронов существенным образом зависит от толщины пленки (из-за столкновений с физическими границами металлического слоя), кроме этого сказывается микроструктура металла [7, 8, 10]. В результате проводимость, которая зависит от толщины слоя, может быть меньше, по сравнению с массивным металлом [11, 12]. Этот эффект сильно зависит от вещества, на которое нанесен металлический слой, и способа нанесения слоя [13, 14]. Если толщина металлического покрытия много меньше классической глубины скин-слоя, то экранирующие свойства удовлетворительно определяются из сопротивления слоя пленки (измеряемого) при условии, что потери на поглощение не учитываются [15, 16]. Учет конечной толщины пленки проводить не обязательно, за исключением ситуации, когда экранирующие свойства должны быть определены для практических опытов.

Для пленок, толщина которых много меньше толщины скин-слоя, расчетные оптические харак-

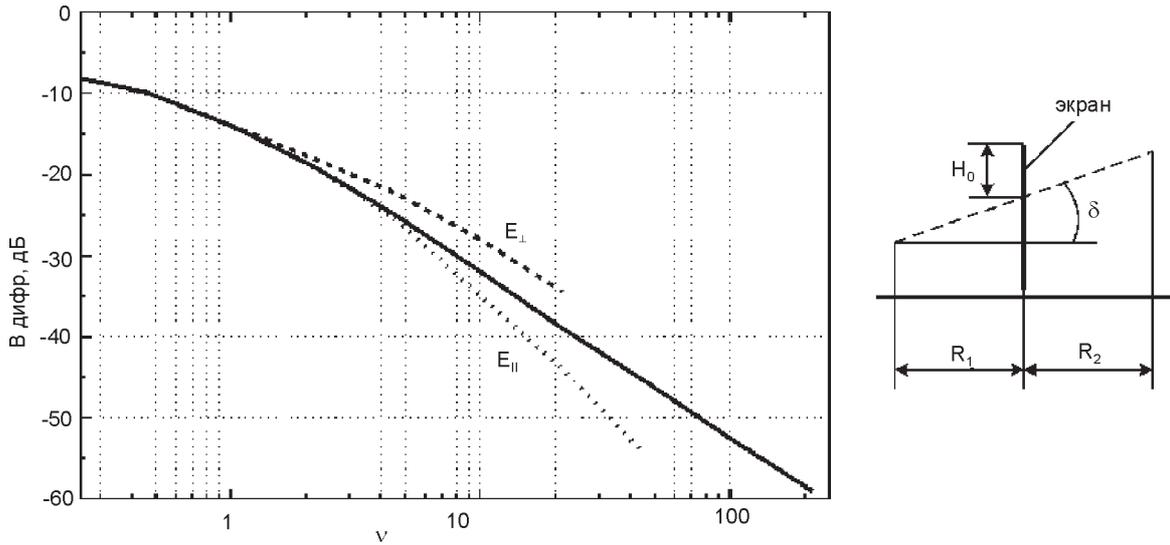


Рис. 2. Зависимости дифракционного затухания от параметра $\nu = H_0 \cos \delta \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$.

теристики не зависят от частоты. С уменьшением толщины пленки (рис. 3) коэффициент отражения по энергии R монотонно убывает, а коэффициент прохождения T – возрастает. Коэффициент поглощения Q достигает максимального значения при некоторой толщине пленки [8]. Электропроводность металлических слоев возрастает с увеличением толщины слоев металла, при этом для тонких слоев электропроводность пропорциональна толщине, а ее значение на СВЧ может превышать в 10 – 100 раз электропроводность на постоянном токе [7].

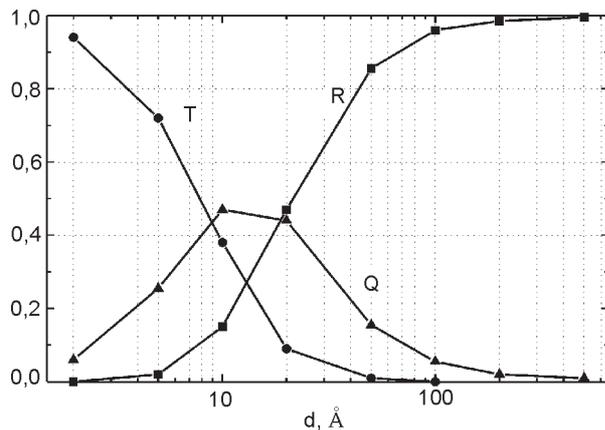


Рис. 3. Зависимости дифракционных коэффициентов от толщины серебряной пленки.

Стекла с токопроводящим покрытием должны обеспечивать необходимую эффективность экранирования при незначительном ухудшении их оптических свойств. Наибольшее распространение получили пленки из окиси олова, которые являются химически устойчивыми, механически прочными и имеют хорошую адгезию со стеклянной подложкой. Стекла с таким покрытием име-

ют поверхностное сопротивление не менее 6 Ом, зависящее от толщины пленки, при ухудшении прозрачности не более, чем на 20 % [10]. В работе [17] теоретически и экспериментально исследовались несколько позолоченных и посеребренных окон. В табл. 2 приведены результаты измерений экранирующих свойств оконных стекол (толщина 6 мм) с различными покрытиями. Расчетные данные хорошо коррелируют с экспериментальными. В противоположность проволочной сетке с существенной частотной зависимостью экранирующих свойств (-20 дБ/декада), металлизированные окна обеспечивают стабильную экранирующую эффективность почти до инфракрасного диапазона.

Таблица 2
Экранирующие свойства металлизированных стекол. Ослабление интенсивности электромагнитного поля для двух частот

№	Покрытие	Толщина	1,25 ГГц	10 ГГц
1	Ag (2 слоя)	160 Е	62 дБ	65 дБ
2	–	–	1,8 дБ	2,2 дБ
3	Au	83 Е	22 дБ	29 дБ
4	Au	135 Е	26 дБ	34 дБ
5	Au	188 Е	32 дБ	38 дБ

Оксиды могут выполнять функции оптических антиотражательных покрытий и подложек для металлических пленок. Выбор материала подложки, при котором достигается максимум коэф-

коэффициента зеркальности P , является весьма важным для улучшения эффективности экранирования. В работе [14] исследовалась поверхность раздела Ag/Ge, а в [13] показано, что для Au/BiO₂ величина коэффициента зеркальности удовлетворяет условию $P > 0.75$. Отметим, что оптически прозрачная тонкая проволочная сетка обеспечивает лучшее экранирование, особенно на частотах выше 30 МГц [18].

Качество металлизированных покрытий определяется, в основном, шероховатостью материала подложки. Металлизационный слой держится прочно в пределах тех механических нагрузок и деформаций, при которых не происходит разрушение подложки. Наиболее технологично цинковое покрытие, обеспечивающее сравнительно высокую эффективность экранирования и обладающее достаточной механической прочностью. Менее технологичное алюминиевое покрытие имеет большую эффективность экранирования [18]. Одним из методов оценки сквозного затухания пленочных материалов (полупроводящих) является измерение поверхностного сопротивления пленки. Однако из-за скин-эффекта этот метод применим только для тонкопленочных покрытий, и в технике защиты от СВЧ излучения его применение весьма ограничено.

Проводящие пластмассы обеспечивают экранирование за счет введения проводящего наполнителя. Преимущества применения проводящих пластмасс, по сравнению с металлизированными пластмассами, объясняются отсутствием трещин, коррозии и отслаивания поверхностного слоя, влияющих на качество экранирования и долго-

вечность изделия. В качестве наполнителей используются смеси графита с карбоволоконном, алюминия с углеродом, никеля с графитом, проводящая стеклоткань и т.д. Основой для изготовления подобных пластмасс являются термопластичные полимеры типа пропилена, полистирола [18].

Конструкция перфорированных экранов должна удовлетворять определенным условиям, обеспечивающим необходимый минимум ослабления экранировки. Выбор размера перфораций и расстояний между ними для отверстий круглой формы может быть приближенно воспроизведен на основании номограммы и формул, приведенных в работе [3]. Затухание для перфорированных металлических экранов с прямоугольной формой перфорированных отверстий (или с сетчатым напылением) может быть получено по методике расчета характеристик дифракционных решеток [19]. При этом учитывается толщина металла, параметры диэлектрических слоев и электромагнитного поля. Разработанные алгоритмы позволяют решать не только задачи анализа, но и оптимизации характеристик многослойных дифракционных структур [20].

Для повышения затухания в перфорированном диэлектрическом экране с напылением желательно применять напыление отверстий изнутри. При этом расчет затухания можно производить по формулам для цельнометаллических перфорированных листов.

На рис. 4 приведены зависимости величины сквозного затухания перфорированных листов от длины волны и параметров перфорации, рассчи-

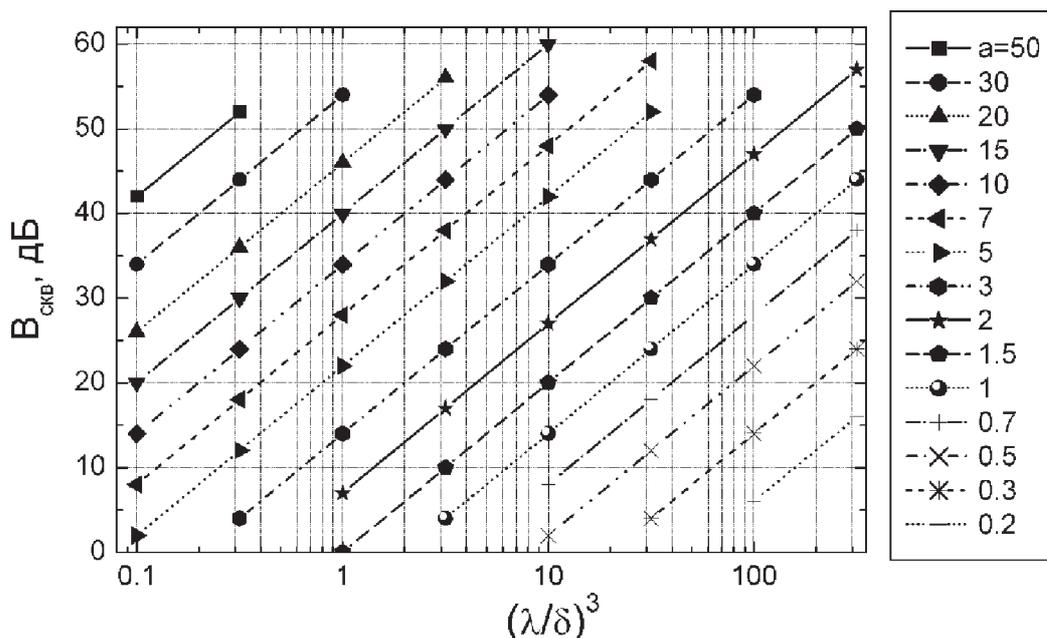


Рис. 4. Ослабление интенсивности электромагнитного поля перфорированными металлическими листами

танные на основании данных работы [3] (a – расстояние между отверстиями, δ – диаметр отверстий). Ослабление сетчатых экранов зависит от размера ячеек и диаметра проволоки и с достаточной для практики точностью определяется по формулам и номограмме, приведенной в работе [21].

Зависимости, построенные на основе этих данных, изображены на рис. 5. Таблица затухания для некоторых стандартных типов сеток приведена в [3]. Например, сетка с диаметром проволоки 0,7 мм обеспечивает экранирование при углах падения радиоволн произвольной поляризации ($\lambda = 1$ м) от 0 до 60° не менее 20 дБ. При длине волны меньшей, чем расстояние между проводами, проволочная сетка не обладает экранирующими свойствами.

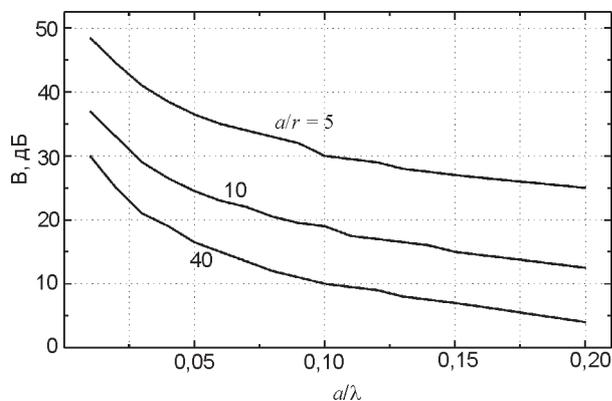


Рис. 5. Зависимости ослабления интенсивности электромагнитного поля металлической сеткой от безразмерного параметра a/λ (a – расстояние между осями проволок; $2r$ – диаметр проволоки; λ – длина волны).

Использование очень плотных сеток с тонкими проводами дает хорошую экранировку и обеспечивает оптическую прозрачность. При средней остроте зрения человеческий глаз различает два объекта с угловым расстоянием в $1'$ (одна минута). Так, например, плотная сетка из покрытой серебром проволоки из нержавеющей стали диаметром 0,0075 см и расстоянием между проводами 0,025 см, обеспечивающая экранировку (относительно воздуха) 61,5 дБ ($\lambda = 30$ см) и 41,5 дБ ($\lambda = 3$ см), может быть различима только на расстоянии около 26,2 см, если только не рассматривать ее в отраженных лучах.

Материал проволоки практически не влияет на величину создаваемого сеткой ослабления (хотя на низких частотах медные сетки эффективнее стальных за счет более высокой удельной проводимости меди, однако с повышением частоты это различие уменьшается [18]), и во всех практических ситуациях можно пренебречь влиянием конечной проводимости проводов.

Поэтому при выборе материала сетки руководствуются, в основном, экономическими соображениями. Для нормальной работы экрана следует обеспечивать надежный электрический контакт в местах соединений отдельных частей сетки.

В работе [22] исследуются радиотехнические характеристики текстильных композиционных материалов в диапазоне СВЧ. По принципу сетчатого экрана построена защитная хлопчатобумажная ткань с микропроводом [5]. Ослабление СВЧ поля такой тканью в диапазоне частот 600 ÷ 10000 МГц составляет соответственно от 40 до 20 дБ. На более низких частотах отдельные элементы экранирующих конструкций, выполненные из таких материалов, начинают вести себя как отдельные изолированные вибраторы, соизмеримые с длиной волны. Это определяет резонансный характер изменения величины затухания. Поэтому при создании сложных конструкций необходимо использовать электропроводящую массу или клей [23]. Защитные свойства ширм и занавесей из радиозащитных тканей ограничены дифракцией, и поэтому они оказываются эффективными только на верхнем участке СВЧ диапазона.

ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (ПЭВ)

Радиопоглощающие материалы (РПМ) предназначены для уменьшения отражения радиоволн внутри экранируемых объектов, а также для обеспечения электрогерметичности. Характеристики некоторых серийно выпускаемых поглотителей приведены в [3, 18, 24 – 27].

С точки зрения электродинамики для более эффективного поглощения СВЧ излучения предпочтительно использовать материалы, имеющие высокие значения мнимых частей диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей. Основные физические свойства ряда материалов (диэлектриков, сегнетоэлектриков, металлов, их окислов, полупроводников, ферритов), которые могут использоваться при создании поглощающих ЭМИ конструкций, приведены в работах [10, 28 – 33]. В этом смысле наиболее эффективным поглощением обладают идеальные проводники (металлы).

В то же время, при падении электромагнитных волн на материал, имеет место отражение от границы раздела сред. Чем больше несоответствие волновых сопротивлений сред, тем больше величина коэффициента отражения. С этой точки зрения использование в качестве радиопоглощающих материалов металлов в чистом виде

оказывается неприемлемым, так как практически невозможно осуществить согласование бесконечно малого волнового сопротивления металла с конечным по величине волновым сопротивлением свободного пространства. Исключения составляют поглотители, в которых поглощение электромагнитной энергии происходит в тонких металлических пленках [34, 35].

При создании широкополосных (ШП) поглощающих покрытий ключевой задачей является согласование поглощающей структуры с окружающим пространством, при котором интегральный эффект отражения минимален. Существует несколько способов уменьшения отражения монохроматических электромагнитных волн от проводящих (отражающих) поверхностей.

Наиболее простой способ уменьшения отражения является резонансным и основан на принципе экрана Солсбери. Слой (тонкая пленка) поглощающего (проводящего) материала [34, 36] расположен на расстоянии $\lambda/4$ перед проводящей поверхностью. Условия оптимального согласования для реальной диэлектрической структуры, содержащей резистивную пленку, с учетом технологии склеивания рассмотрены в работах [37, 38]. Другой конструкцией ПЭВ является поглотитель, состоящий из слоя РПМ, перед которым располагается согласующий четвертьволновый слой из непоглощающего материала [10]. Такой поглотитель эффективно работает только на фиксированной частоте и при нормальном падении волны на проводящую поверхность, поэтому применение этого способа на практике малоэффективно. Расчет многослойного экрана Солсбери с широкополосной АЧХ проведен в работе [39].

Второй способ уменьшения отражения основан на том, что волновое сопротивление непроводящего материала определяется выражением $Z = (\mu/\epsilon)^{1/2}$. Выбором нужного отношения магнитной и диэлектрической проницаемости μ/ϵ можно сделать Z , равным сопротивлению свободного пространства. Если гистерезисные петли μ и ϵ одинаковы, так что для любой пары напряженностей полей E и H отношение μ/ϵ одно и то же, то слой этого поглощающего материала будет для падающей волны подобием пустого пространства (для случая нормального падения). На этом принципе строятся ферритовые поглотители. Их типичный диапазон применения от 30 МГц до 1 ГГц.

Для углов падения волн, отличных от нормального, характер отражения существенно изменяется. На рис. 6 показаны зависимости

модуля коэффициента отражения R от приведенной частоты $\Omega = \omega\epsilon/\sigma$ при различных значениях Z . E -поляризованная электромагнитная волна падает на границу проводящей среды под углом $\alpha = 60^\circ$. При этом минимум коэффициента отражения наблюдается при $Z = 1/2$. Характеристики для H - и E -поляризованного поля совпадают при замене Z на $1/Z$.

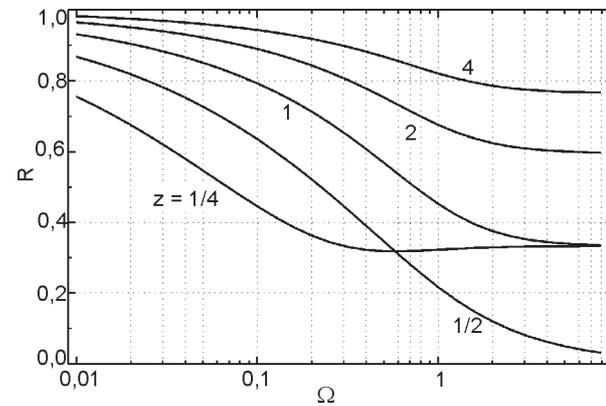


Рис. 6. Отражение электромагнитных волн от границы поглотителя.

Обычно ферриты располагают на проводящей поверхности, которая отражает падающую волну. Таким образом, волна, отраженная от проводящей поверхности, должна дважды пройти через поглощающий материал. На определенных частотах отраженная волна и падающая волна будут гасить друг друга, как в случае экрана Солсбери, и поглощение будет очень эффективным. Отражающая способность в максимуме естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) для ферритовых поглотителей, используемых подобным образом, составляет – (25 ÷ 35) дБ (т.е. отражается менее 2 % падающей энергии), при толщине материала 5 ÷ 8 мм, что составляет часть расстояния $\lambda/4$, требуемого для экрана Солсбери. Эти материалы имеют заметный резонанс, но они еще достаточно эффективно поглощают в широком диапазоне для частот ниже 1 ГГц. На рис. 7 показана зависимость коэффициента отражения от частоты для ПЭВ на основе ферромагнитного материала [40]. Кривая 1 соответствует структуре: слой феррита – воздушный слой – металлический экран, 2 – структура без воздушной прослойки. При создании воздушной прослойки диапазон частот, в котором $|R| < 10\%$, увеличивается от 10:1 до 20:1.

В работах [40, 41] отмечаются преимущества и недостатки использования материалов типа ферритов и других магнитодиэлектриков для создания ПЭВ. В качестве тонкослойных ПЭВ ферриты с высокой магнитной проницаемостью

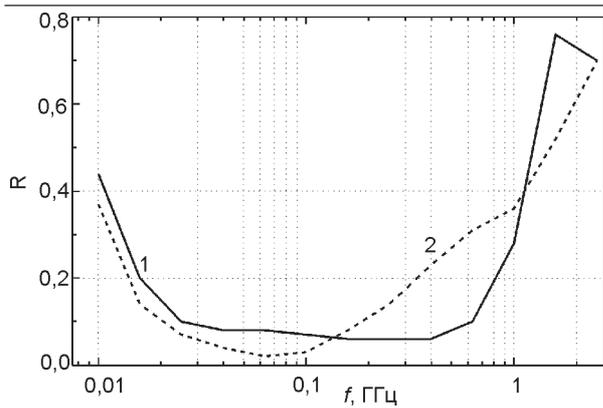


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения для поглотителя на основе материала Ferramic E.

имеют преимущества: малая толщина слоя, незначительное смещение верхнего предела частот при большой толщине слоя. Их недостаток — ограничение теоретически возможного рабочего диапазона при низких частотах. Преимущество ферритов с низкой магнитной проницаемостью — нижний предел частоты определяется только положением частоты гиромангнитного резонанса, недостаток — необходимость большой толщины слоя и сильное смещение верхнего предела частот [40]. Вопросы расчета характеристик и применения тонких монокристаллических (анизотропных) пленок ферритов в устройствах СВЧ рассмотрены в работах [42, 43]. Методика определения характеристик многослойной анизотропной структуры с бесконечно тонкими импедансными пленками приведена в работе [44].

В настоящее время получили широкое распространение барьерные гексагональные ферриты [45, 46]. Поглощение ЭМИ гексаферритами происходит, в основном, также за счет ЕФМР. Причем частоту ЕФМР можно изменять путем легирования ферритов различными элементами — Al, Sc и др. [47], которые приводят к изменению внутренних магнитных полей материалов.

Большое внимание специалистов привлекают разработки ПЭВ и РПМ на основе композитных материалов, в частности из ферритрезиновых смесей с включенными в них короткими металлическими волокнами [48]. Введение в материал волокон в количестве от 1 до 3 % по массе смеси позволяет изменять диэлектрическую проницаемость в широких пределах. В работе [49] рассмотрены композитные материалы на основе ферритовых взвесей. В качестве искусственных наполнителей часто используют металлические проводники различной формы [50 – 52]. Материалы, содержащие проводящие включения сложной формы: разомкнутые и замкнутые проводящие кольца [53, 54], омега-частицы [55], оди-

нарные и би-спирали [56, 57], диэлектрические включения различной формы с большой диэлектрической проницаемостью [58], имеют уникальные характеристики в СВЧ диапазоне, которые невозможно достигнуть в композитах, построенных на основе порошков металлов. Например, возможно проявление сильной дисперсии и получение больших значений диэлектрической проницаемости и др. Такие включения формируют эквивалентный резонансный контур, возбуждаемый токами, которые порождаются магнитным полем. В случае нитевидных металлических включений композитный материал приобретает дополнительно эффективную магнитную поляризуемость, резонансно зависящую от частоты электромагнитного поля. В случае малых диэлектрических включений с большой диэлектрической проницаемостью (диэлектрические резонаторы различной формы) в них возбуждаются собственные электромагнитные колебания на магнитных модах [59]. Фактически характерные размеры включений существенно меньше длины волны падающего ЭМИ.

В работе [50] показано, что структурная среда с элементами в виде кольцевых проводников имеет диамагнитные свойства и большие магнитные потери в широком диапазоне частот. Использование в качестве наполнителя металлических спиралей [52] приводит к дополнительной связи между электрическим и магнитным полями. Наличие такой связи может способствовать снижению уровня отражения электромагнитных волн. Достоинством киральных сред [60 – 82] является возможность увеличения эффективной магнитной проницаемости без применения тяжелых магнитных материалов. Задача анализа для таких материалов состоит в том, что при заданном соотношении компонентов смесей в композиционном материале определяются составляющие комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей с учетом дополнительно введенных электропроводящих и магнитосодержащих элементов.

Широкое практическое применение могут найти полупроводниковые материалы (карбид кремния и др.). РПМ, выполняемые в виде объемных блоков из полупроводящих сред, характеризующихся определенным распределением проводимости σ , электрической ϵ и магнитной μ проницаемостей по структуре сред, обладают малым коэффициентом отражения, а их сквозное затухание обычно очень велико, вследствие того, что тыльная сторона РПМ покрыта металлическим листом, например, фольгой

[10]. В то же время при использовании полупроводниковых материалов следует соблюдать осторожность ввиду сильной зависимости их электрических свойств от температуры.

Поглотители с геометрическими неоднородностями имеют значительные размеры, по сравнению с плоскими ПЭВ, однако при этом обладают рядом достоинств. В поглотителях такого типа наиболее просто реализуется широкая рабочая полоса частот при малом коэффициенте отражения, они достаточно технологичны и обладают хорошими эксплуатационными характеристиками. Методы расчета ПЭВ с геометрическими неоднородностями на примере клиновидных поглотителей приведены в работе [83].

Использование многослойного покрытия из различных материалов позволяет расширить диапазон, оптимизировать покрытие по толщине [49, 85, 85]. Это справедливо практически для поглотителей любых типов. В многослойных поглотителях электропроводность слоев (резистивных пленок) увеличивается по мере приближения к металлическому экрану [20, 36]. На рис. 8 приведена расчетная зависимость коэффициента отражения в диапазоне длин волн для структуры из четырех диэлектрических слоев и трех проводящих пленок, из которой следует, что отраженная энергия практически во всем диапазоне $\lambda_0/\lambda = 1 \div 4$ составляет менее 1 % от падающей на структуру. Если увеличивать число слоев при соответствующем расширении диапазона, то по своим свойствам многослойные поглотители будут близки к поглотителям градиентного типа. При уменьшении расстояния между проводящими слоями верхняя граница частот будет смещаться.

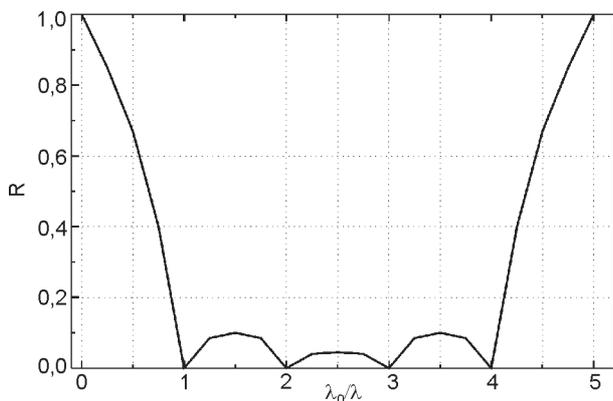


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения для многослойного поглотителя от безразмерного параметра λ_0/λ .

В поглотителе градиентного типа используется постепенное изменение от сопротивления Z и проводимости $\sigma = 0$ свободного пространства на поверхности падения поглотителя до более

низкого сопротивления и более высокой проводимости на его задней (тыльной) стороне. Это постепенное изменение может быть достигнуто либо изменением свойств материала, либо изменением его геометрической формы, что реализуется в пенных пирамидах с углеродным наполнением. Такие поглотители могут обладать большой широкополосностью при малой величине коэффициента отражения и небольшой толщине ПЭВ, однако являются наиболее сложными с точки зрения практического воплощения. Методики расчета градиентных структур приведены в работах [34, 86, 87]. Обзоры электродинамических методов анализа неоднородных сред можно найти в работах [83, 88].

Механизм поглощения ЭМИ в материалах типа металл–диэлектрик, полупроводник–диэлектрик, феррит–диэлектрик определяется механизмом поглощения в металлах (полупроводниках, ферритах). При взаимодействии ЭМИ с металлом объем, в котором наблюдается эффективное поглощение, ограничивается величиной скин-слоя. На модельных ферромагнитных пленках было показано [89], что эффективную глубину скин-слоя можно увеличить путем разбиения толстого слоя металла на более тонкие, изолированные друг от друга слои, причем толщина каждого слоя не должна превышать величины скин-слоя для данного металла при определенной длине волны. Однако отсутствие анизотропных свойств и технологическая легкость получения позволяет считать, что порошковые (композитные) поглощающие материалы более универсальны [10, 90, 91].

Для порошковых материалов, предназначенных для объемного поглощения энергии ЭМИ, одним из главных является вопрос о микроструктуре материала. Оценка роли размера изолированных металлических частиц и микрообъемов приведена в работе [92]. Максимальное поглощение в материале типа металл–окисел алюминия наблюдается при весовом содержании в сплавах металлической составляющей 40–50% (рис. 9). При большем процентном содержании металлической компоненты эффект объемного поглощения исчезает – падающая волна практически полностью отражается. Такие закономерности справедливы для широкого диапазона частот и углов падения волн [10].

Электродинамический расчет таких смесей может быть проведен аналогично обычным магнитодиэлектрикам с использованием эффективных значений проницаемостей. Большой практический интерес представляет задача синтеза, а

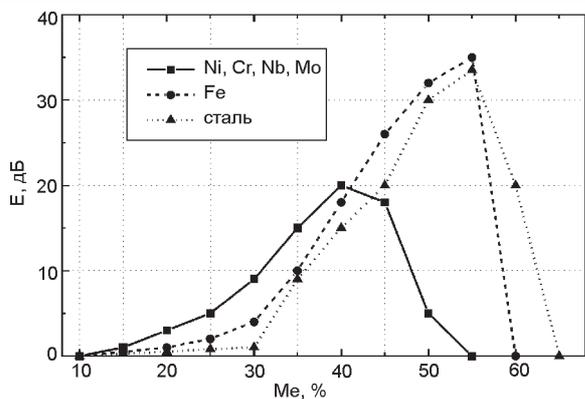


Рис. 9. Зависимости поглощаемой СВЧ энергии от содержания в материале металлов.

именно выбор исходных компонентов смеси для получения материалов с заданными свойствами.

РПМ на основе диэлектриков, например, пластики с углеродным наполнением, имеют сравнительно небольшую плотность, однако толщина покрытия должна быть значительной. Для уменьшения мощности падающей волны на 20 и 30дБ толщину покрытия можно вычислить по формулам: $D_{20дБ} = 0,279/\sqrt{\epsilon}$; $D_{30дБ} = 1,65/\sqrt{\epsilon}$, где f – частота, ϵ – относительная диэлектрическая постоянная.

Очевидно, что с увеличением длины волны, особенно при переходе в дециметровый и метровый диапазон, необходимая толщина покрытия становится достаточно большой ($D = 300$ мм для $f = 1$ ГГц).

По всей вероятности, наилучшими электродинамическими, механическими и эксплуатационными характеристиками в наземных условиях будут обладать материалы и покрытия, реализованные при использовании всех выше перечисленных способов. Т.е., это должны быть сложеннокомпонентные феррит-диэлектрические материалы с металлическим наполнителем, имеющие плавный (постепенный) переход от свободного пространства к слоям с достаточно большими значениями проницаемостей и потерь. При этом для увеличения поглощения может быть использовано резонансное поглощение энергии электромагнитного поля в отдельных слоях. В поглотителе могут использоваться металлические элементы, производящие дополнительное рассеяние электромагнитных сигналов, повышающие механическую прочность и улучшающие теплоотвод. Оптимальное согласование с окружающим пространством может обеспечиваться при определенных соотношениях между значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. С точки зрения стабильности электрических характеристик в слоистых структурах желательно применять материалы на основе смеси металличе-

ских порошков с диэлектрическими непоглощающими смесями.

Для создания ШП поглотителей принципиально необходимо учитывать дисперсионные свойства составляющих поглотитель слоев.

Разработка и проектирование РПМ и ПЭВ основаны на аналитических методах расчета и экспериментальных исследованиях. Задача анализа состоит в том, что по заданным параметрам исходных электромагнитных полей и конструкций поглощающих и отражающих экранов определить степень защиты. При этом определяется распределение электромагнитных параметров по толщине структуры, обосновывается электродинамическая модель для расчета и проводится прямой расчет коэффициента отражения или коэффициента прохождения в заданном диапазоне частот при выбранной толщине структуры и ее геометрической конфигурации.

Наиболее сложным вопросом при разработке РПМ и ПЭВ является задача синтеза для получения заданного коэффициента отражения (прохождения) в требуемых диапазонах частот при определенных ограничениях на параметры материала (экрана) [20, 84, 93]. Определение электромагнитных параметров составных частей композиционных материалов, распределение их по толщине структуры, обеспечение радиотехнических характеристик и возможностей физической реализации смесей РПМ и ПЭВ входит в задачу синтеза при заданном частотном диапазоне и максимально допустимом коэффициенте отражения [26]. В процессе разработки РПМ подбором специальных сред и распределением их электродинамических и электрофизических характеристик по фазовому пространству материала можно добиться очень малых отражений, вплоть до долей процента.

В работе [94] на основе формул Френеля предложена методика проектирования многослойных ПЭВ, позволяющая выполнить расчет оптимальных широкополосных поглотителей с учетом частотной дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов слоев. Нахождение оптимального ПЭВ заключается в определении путем реализации процедуры направленного поиска, значений варьируемых параметров, минимизирующих целевую функцию при суммарной толщине слоев, меньше заданной.

Следует отметить, что создание материалов, эффективно поглощающих несинусоидальные (импульсные) сигналы и волновые пакеты [95, 96], сопряжено с серьезными трудностями. Поглощение электромагнитной волны сопровож-

дается омическими или гистерезисными потерями [97]. Омические потери наблюдаются, например, в пластике с порошковым угольным наполнителем. Практическое его использование для поглощения сигналов с относительно широкой полосой невозможно, в связи с неприемлемым увеличением толщины покрытия. Для существующих в настоящее время ферритовых покрытий согласование импеданса со свободным пространством обеспечивается в сравнительно узкой полосе частот. Анализ показывает, что при отражении несинусоидальных сигналов от ферритового покрытия происходит существенное изменение формы импульса. Так, при попадании на ферромагнитный материал положительных импульсов трапециидальной формы при отсутствии магнитного насыщения потери энергии вообще отсутствуют. Иными словами, ферромагнитные материалы слабо поглощают энергию сигналов с относительно широкой полосой.

Большинство методов расчета предназначено для определения экранных свойств материалов и лишь некоторые из них пригодны для оценки затухания конструктивных элементов изделия в целом. Поэтому приходится разграничивать защитные свойства материалов и изделий из них. Основными причинами этого являются отличие радиочастотных свойств стыков и различного рода конструктивных элементов от свойств материалов, наличие неизбежных в конструкциях складок, неровностей, изгибов, близких или кратных длине волны облучающего поля. Сквозное затухание листа материала всегда больше, чем в конструкции, и это необходимо учитывать.

Наиболее трудным для учета оказывается влияние побочных переизлучений, возникающих из-за крупных радиоотражающих поверхностей и даже отдельных резонирующих элементов. Влияния одиночных переизлучателей чаще всего определяется экспериментально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для успешного решения комплексной задачи защиты от воздействия ЭМИ необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований экранирующих и поглощающих свойств образцов различных материалов, отдельных элементов и конструкций из них. Естественно, что одновременно с разработкой радиозащитных средств должны разрабатываться также и соответствующие современные средства и способы контроля их свойств. Некоторые из них предполагают использование обычных интенсиметров, но чаще всего требуют создания совре-

менных автоматизированных установок и стендов, отвечающих особым требованиям в отношении чувствительности, динамического диапазона, поляризации, характеристик передающих и приемных антенн и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркин А.В. Безопасность излучений от средств электронно-вычислительной техники: домыслы и реальность //Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 12. – С.102-124.
2. Герасимов В., Владиславский В. Комплексная автоматизация и защита информации//Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 2. – С. 49-63.
3. Минин Б.А. СВЧ и безопасность человека. – М.: Сов. радио, 1974. – 351 с.
4. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1965. – 783 с.
5. Крылов В.А., Юченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. – М.: Сов. радио, 1972. – 216 с.
6. Andersson T. The Electrical Properties of Ultrathin Gold Films During and After Their Growth on Glass// J. Phys. D.: Appl. Phys. – 1976. – Vol.9. – P. 973-985.
7. Валюкенас В.И., Видугирите А.А., Кибартас В.В., Лауцюс А.С., Мешкоутис Ю.А. Исследование электропроводности тонких слоев Cu и Al на СВЧ и постоянном токе//Литовский физический сборник. – 1968. – VIII, № 4. – С. 22-29.
8. Каплан А.Е. Об отражательной способности металлических пленок в СВЧ- и радиодиапазоне // Радиотехника и электроника. – 1964. – №10. – С. 15-21.
9. Колпаков В.В. Приближенные граничные условия для проводящей пластины //Труды Сибирского физико-технического института. – 1960. – В.39. – С. 79-85.
10. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ- излучения. – М.: Наука, 1982. – 164 с.
11. Pichard et. al. Alternative Analytical Forms of the Fuchs-Sondheimer Function // J. Mat. Sci. – 1985. – Vol.20. – P. 4185-4201.
12. Chen Chu-Xing. Calculation of Average Electron Mean Free Path for Metallic Thin Films // J. Mat. Sci. Let. – 1987. – Vol.6. – P. 232-234.
13. Gillham E.J. et. al. A Study of Transparent Highly Conducting Gold Films // Phil. Mag. – 1955. – Vol.46. – P. 1051-1068.
14. Chopra K.L., Randlett M.R. The Influence of a Superimposed Film on the Electrical Conductivity of Thin Metal Films // J. Appl. Phys. – 1967. – Vol.38, ?8. – P. 3144-3147.
15. Liao S.Y. Light Transmittance and RF Shielding Effectiveness of a Gold Film on a Glass Substrate // IEEE Trans. EMC. – 1975. – Vol. EMC-17, ?4. – P. 211-216.
16. Liao S.Y. RF Shielding Effectiveness and Light-transmittance of Copper or Silver Film Coating on

- Plastic Substrate // IEEE Trans. EMC. – 1976. – Vol. EMC-18, №4. – P. 148-153.
17. Vaessen W.T.E. Transmissiemetingen aan Bouwmaterialen, Reflectie aan Draadschermen en de Fysica van Dunne Metaallagen // The Netherlands: EUT internal report, May 1987. – 112 p.
 18. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1990. – 351 с.
 19. Адонина А.И., Островский О.С. Решетка из брусьев, расположенная на двухслойном магнито-диэлектрике // Изв.вуз. Радиофизика. – 1987. – Т.30, №4. – С. 560-562.
 20. Островский О.С., Сорока А.С., Шматько А.А. Оптимизация широкополосных неотражающих многослойных покрытий // Конференция и выставка “СВЧ-техника и спутниковый прием”. Материалы конференции. Севастополь, 1994. – С. 125-127.
 21. Мамфорд У.У. Некоторые проблемы опасности микро-волнового излучения для организма человека // ТИИЭИР. – 1961. – Т.49, №2. – С. 462-482.
 22. Коварский А.В., Онищенко Л.А., Филатов В.Н. Радиотехнические характеристики композиционных материалов в СВЧ-диапазоне // Дифракция и распростран. электромагн. и акуст. волн. Моск. физ.-техн. ин-т. (М.). – 1992. – С. 126-128.
 23. Экранирующая одежда: А.с.317373, СССР / Б.А.Минин. – № 1299589/28-12; Заявлено 15.01.69, Опубл. 19.10.71, Бюл. №31. – 2 с.
 24. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – №2. – С. 93-113; №3. – С. 71-92.
 25. Торгованов В.А. Безэховые камеры // Зарубежная радиоэлектроника. – 1974. – №12. – С. 20-46.
 26. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №2. – С. 75-82.
 27. Anechoic R.F. Chamber Test Facilities. – KEENE Corp, 1982. – 154 p.
 28. Келдыш Л.В., Копаев Ю.В. Возможная неустойчивость полуметаллического состояния относительно кулонов-ского взаимодействия // ФТТ. – 1964. – Т.6, №9. – С. 2791-2798.
 29. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. - Л.: Энергия, 1977. – 352 с.
 30. Электрорадиоматериалы / Б.М.Тареев, Н.В.Короткова, В.М.Петров и др. – М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.
 31. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. – М.: Радио и связь, 1989. – 287 с.
 32. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. – М.,Л.: Энергоиздат, 1959. – 336 с.
 33. Алимин Б.Ф., Торгованов В.А. Методы расчета поглотителей электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. – 1976. – №3. – С. 29-57.
 34. Шнейдерман Я.А. Новые радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1969. – №6. – С. 101-124.
 35. Слуцкая В.В. Тонкие пленки в технике СВЧ. – М.,Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 399 с.
 36. Harmut H.F. Antennas and Waveguides for Nonsinusoidal Waves. – 1984. – 276 p.
 37. Пономаренко В.И., Куприянов И.К., Журавлев С.И. Неотражающая структура на основе резистивной пленки с малой емкостной компонентой проводимости // Радиотехника и электроника. – 1992. – №2. – С. 346-348.
 38. Liu Ji-Chyun, Bor Sheau-Shong, Lu Po-Chiang Equal Ripple Responses for Designing a Salisbury Screen // Int. J. Electron. – 1994. – Vol.76, №2. – P. 329-337.
 39. Пономаренко В.И., Мировицкий Д.И., Журавлев С.И. Радиопоглощающая структура с резистивно-емкостной пленкой // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т.39, №7. – С. 1078-1080.
 40. Алимин Б.Ф. Методы расчета поглотителей электро-магнитных волн. Часть II // Зарубежная радиоэлектроника. – 1976. – №8. – С. 60-80.
 41. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. – 1993. – 29, №6, Pt 3. – P. 4209-4214.
 42. Курушин Е.П., Нефедов Е.М. Электродинамика анизотропных волноведущих структур. – М.: Наука, 1983. – 223 с.
 43. Курушин Е.П. Распространение волн в прямоугольном волноводе с тонкой поглощающей ферритовой пленкой // Изв. вуз. Радиофизика. – 1979. – Т. 22, №2. – С. 248-250.
 44. Bruno A., Piergiorgio U. Reflection and Transmission for Planar-Layered Anisotropic Structures // Radio Sci. – 1991. – Vol. 26, №2. – P. 517-522.
 45. L.K. Mikhailovsky, A.A. Kitaitsev, V.P. Cheparin et al. Composite Gyromagnetic Materials on the Base of High-Anisotropic Ferromagnetics for Electronic Techniques Production // Proc. of ICMF'94. – Gyulechitsa, Bulgaria, 1994. – P. 142-148.
 46. Китайцев А.А., Колединцева М.Ю., Шинков А.А. Применение однослойных и многослойных композиционных гиромангнитных толстых пленок для фильтрации СВЧ колебаний // Материалы 7-й Международн. конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Севастоп. гос. техн. ун-т. – 1997. – С. 127-128.
 47. Чепарин В.П., Китайцев А.А., Еремцова Л.Л. и др. Легированные гексаферриты для радиопоглощающих материалов // Proc. of the Int. Conf. on Currentless Spin-Electronics. Moscow, МРЕТ (ТУ), 1995. – P. 313.
 48. Hatakeyama K., Inui T. Electromagnetic Wave Absorber Using Ferrite Absorbing Material Dispersed with Short Metal Fibers // IEEE Trans. – 1984. – Vol. MAG-20, №3. – P. 1261-1263.
 49. Jha Vandana, Banthia Ajit K. Composites Based on Waste-Ferrites as Microwave Absorbers // Indian J. Phys. A. – 1989. – Vol. 63, №5. – P. 514-525.

50. Костин М.В., Шевченко В.В. Теория искусственных магнетиков на основе кольцевых токов // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37, №11. – С. 1992-2003.
51. Казанский В.Б., Кошпаренко Д.В., Минаков Ю.А., Юнусов А.А. Слоистые структуры на металлической подложке // “Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн”. Материалы конференции. Харьков, 1994. – С. 91-94.
52. Bohren Craig F., Luebbers Raymond, Langdon H. Scott Microwave-Absorbing Chiral Composites: Chirality Essential or Accidental // Appl. Opt. J. – 1992. – Vol.31, №30. – P. 6403-6407.
53. Лагарьков А.Н., Панина Л.В., Сарычев А.К. Эффективная магнитная проницаемость композитных материалов вблизи порога протекания // ЖЭТФ. – 1987. – Т.93, вып. 1(7). – С. 215-221.
54. Казанцев Ю.Н., Костин М.В., Крафтмахер Г.А. и др. Искусственный парамагнетик // Радиотехника и электроника. – 1994. – № 10. – С. 1652-1655.
55. Vegni L., Toscano A. Electromagnetic Field Radiated by an Electric Point-Source in the Omega Medium With Circular Cylindrical Symmetry // Proc. of Bianisotropics'97. – Glasgow, Scotland. – P. 129-131.
56. Semenenko V.N., Raybov D.E. Microwave Effective Permeability of Conductive Helices // Seminar on Electrodynamics of Chiral and Bianisotropic Media. – Proc. of Bianisotropics'93. – Gomel (Belarus). – P. 116-120.
57. Lagarkov A.N., Semenenko V.N., Chistiaev V.A. et al. Resonance Properties of Bi-Helix Media at Microwaves // Electromagnetics. – 1997. – № 3. – P. 213-237.
58. Семененко В.Н., Чистяев В.А., Рябов Д.Е. Искусственный магнетизм композитных материалов на основе диэлектрических резонаторов // Материалы Междунар. конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Севастоп. гос. техн. ун-т. – 1997. – С. 113-116.
59. Бурсиан Е.В. Нелинейные кристаллы (титанат бария). – М.: Наука, 1974. – 183 с.
60. Каценеленбаум Б. З., Коршунова Е.Н., Сивов А. Н., Шатров А.Д. Киральные электродинамические объекты // УФН. – 1997. – Т. 167, № 11. – С. 1201-1212.
61. Казанцев Ю. Н., Крафтмахер Г. А. СВЧ-магнитная проницаемость киральных сред. Взаимовлияние кирального и ферромагнитного резонансов в структуре среда-феррит // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42, № 3. – С. 277-283.
62. Третьяков С. А. Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы (обзор) // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, № 10. – С. 1457-1470.
63. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A. J. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media. – London: Artech House, 1994. – 284 p.
64. Tretyakov S. A. and F. Mariotte. Maxwell-Garnett Modeling of Uniaxial Chiral Composites with Bianisotropic Inclusions // Journ. Electromagnetic Waves Applicat. – 1995. – Vol. 9, № 7/8. – P. 1011-1025.
65. Tretyakov S. A. et. al. Analytical Antenna Model for Chiral Scatterers: Comparison with Numerical and Experimental Data // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1996. – Vol. 44, № 7. – P. 1006-1013.
66. Шевченко В. В. Дифракция на малой киральной частице // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40 – № 7. – С. 1777-1789.
67. Kamenetski E. O. On the Technology of Making Chiral and Waveguides for Microwave Propagation // Microwave and Optical Technol. Letters. – 1996. – Vol. 11. – P. 103-107.
68. Whites K. W. Full Wave Computation of Constitutive Parameters for Lossless Composite Chiral Materials // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1995. – Vol. 43, № 4. – P. 376-384.
69. Chung C. Y. and Whites K. W.: Effective Constitutive Parameters for an Artificial Uniaxial Bianisotropic Chiral Medium // Journal Electromagnetic Wave Applicat. – 1996. – Vol. 10, № 10. – P. 1363-1388.
70. Bahr A. J. and Clausing K. R. An Approximate Model for Artificial Chiral Material // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1994. – Vol. 42, № 12. – P. 1592-1599.
71. Whites K. W. and Chung C. Y. Experimentally Observed and Numerically Predicted Scattering Response of Uniaxial Bianisotropic Chiral Material Slabs. // Conf Bianisotropics'97, Glasgow. – 1997. – P. 59-62.
72. Sihvola A.H., Lindell I. V. Chiral Maxwell-Garnett Mixing Formula // Electron. Letters. – 1990. – Vol. 26, № 2. – P. 118-119.
73. Sihvola A.H., Lindell I. V. Analysis on chiral mixtures // Journ. Electromagnetic Wave Applicat. – 1992. – Vol.6, №. 5/6. – P. 553-572.
74. Mariotte F., Tretyakov S.A. and Saviac B. Modelling Effective Preoperties of Chiral Composites // IEEE Antennas Propagation Mag. – 1996. – Vol. 38. – P. 22-32.
75. Mariotte F., Tretyakov S.A. and B. Saviac. Isotropic Chiral Composite Modeling: Comparison Between Analytical, Numerical and Experimental Results // Microwave Opt. Technol. Letters. – 1994. – Vol. 7, №18. – P. 861-864.
76. Simovski C. R, Tretyakov S.A., B. Sauviac, and D.Ya. Khaliullin. Electromagnetic Interaction of Small Chiral Particles // AEU (International Journal of Electronics and Communications). – 1998. – Vol. 52, №1. – P. 25-31.
77. Shanker B., Lakhtakia A. Extended Maxwell Garnett Model for Chiral-in-Chiral Composites // Journal Phys. D.: Appl. Phys. – 1993. – Vol. 26. – P. 1746-1758.
78. Liu J.C and D. Jaggard. Chiral Layers on Planar Surfaces // Journ. Electromagnetic Wave Applicat. – 1992. – Vol. 6, № 5/6. – P. 651-667.
79. He S. and Y. Hu. Electromagnetic Scattering from a Stratified Bi-isotropic (Nonreciprocal Chiral) Slab: Numerical Calculations // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1993. – Vol. 41, № 8. – P. 1057-1062.
80. Lindell I. V., Sihvola A.H. Plane-Wave Reflection from Uniaxial Chiral Interface and its Application to

- Polarization Transformation // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1995. – Vol. 43, № 12. – P. 1397-1404.
81. Cory H., Rosenhouse L. Multilayered Chiral Filters // Electromagnetics. – 1997. – Vol. 17, № 4. – P. 317-341.
 82. Krowne C. M. Electromagnetic Properties of Non-reciprocal Composite Chiral-Ferrite Media // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1993. – Vol. 41, № 9. – P. 1289-1295.
 83. Алимин Б.Ф. Техника расчета отражения и рассеяния от поглотителей электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. – 1977. – №3. – С. 128-151.
 84. Ковалева Т.Ю., Безъязыкова Т.Г., Шафпанский В.С. Магнитоэлектрики для СВЧ-поглощающих экранов // Радиолетроника и связь. – 1991. – № 2. – С. 84-86.
 85. Lekner J. Nonreflecting Stratifications // Can. J. Phys. – 1990. – V.68, № 9. – P. 738-748.
 86. Гребенюк Ю.И., Островский О.С., Сорока А.С. Аппроксимация градиентнонеоднородного магнитоэлектрика в задачах моделирования волноводных устройств // Конференция и выставка “СВЧ-техника и спутниковый прием”. Материалы конференции. Севастополь, 1992. – С. 535-540.
 87. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
 88. Капилевич Б.Ю. Волновые явления в одномерных функциональных средах // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – №6. – С.29-53.
 89. Киренский Л.В., Чистяков Н.С. О некоторых возможностях практического использования ферромагнитных пленок на сверхвысоких частотах // ДАН СССР. – 1965. – Т.165, №1. – С. 81-84.
 90. Ковнеристый Ю.К. Изыскание конструкционных маломагнитных сплавов железа, предназначенных для работы при обычных, низких и повышенных температурах, а также в условиях воздействия СВЧ излучений // Высокопрочные немагнитные сплавы. – М: Наука, 1973. – С.12-28.
 91. Jha V., Banthia A.K. Composites Based on Waste-Ferrites as Microwave Absorbers // Indian J. Phys.A. – 1989. – Vol.63. – №5. – P. 514-525.
 92. Ковнеристый Ю.К. Поглощение СВЧ излучений в гетерогенных сплавах // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – №6. – С. 139-140.
 93. Титов А.Н. К синтезу сверхширокополосного радиопоглощающего слоя // Автоматизир. проектир. устройств СВЧ. – Моск. ин-т радиотехн., электрон. и автомат., 1991. – С.110-119.
 94. Воротницкий Ю.И. Оптимальное проектирование многослойных поглотителей электромагнитных волн // Болг. физ.ж. – 1987. – Т.14, №4. – С. 378-385.
 95. Горюшко Д.Н., Шматько А.А. Отражение радиопимпульса от гиротропной ферритовой пленки на диэлектрическом слое // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, № 544. – “Радіофізика та електроніка”. – 2002. – В. 1’2002. – С. 104-107.
 96. Горюшко Д.Н., Шматько А.А. Рассеяние волновых пакетов анизотропным гиромангнитным слоем // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, № 467. – Радіофізика та електроніка. – 2000. – В. 1’2000. – С. 102-105.
 97. Harmut H.F. Radiation of Nonsinusoidal Waves by Large-Current Radiator // IEEE Trans. – 1985. – Vol. EMC-27, №2. – P. 77-87.

ЗАХИСНІ ЕКРАНИ ТА ПОГЛИНАЧІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

О.С. Островський, Є.М. Одаренко, О.О. Шматько

Розглянуто основні принципи захисту різноманітних об'єктів від впливу НВЧ випромінювання на основі екранування та використання радіопоглинаючих матеріалів. Наведено огляд різноманітних типів захисних екранів, конструкцій та матеріалів, що застосовуються для їх виготовлення. Розглянуто електромагнітні властивості радіопоглинаючих матеріалів та середовищ, в тому числі, композитних і кіральних та фізичні принципи їх функціонування.

PROTECTIVE SHIELDS AND ELECTROMAGNETIC WAVES ABSORBERS

O.S. Ostrovskij, Ye.N. Odarenko, A.A. Shmatko

Basic principles of different object protection from the microwave radiation effect on the base of shielding and using the radioabsorb materials are considered. This work is devoted to review of different types of shields, design and materials for their fabrications. Electromagnetic characteristics of radioabsorb materials and media, including composite and chiral, and physical principles of their operation are considered.