

УДК 620.2

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л.М. ЛЫНЬКОВ, В.А. БОГУШ, Т.В. БОРБОТЬКО, Е.А. УКРАИНЕЦ, Н.В. КОЛБУН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 15 ноября 2003

Рассмотрены основные материалы для экранов электромагнитного излучения и методы их изготовления. Особое внимание уделено синтезу композитных металлоорганических волокон и применению машинно-вязальной (трикотажной) технологии для изготовления экранов и поглотителей электромагнитного излучения. Описывается методика изготовления и приводятся свойства материалов, полученных на основе синтетических и натуральных волокон, содержащих наноразмерные включения металлов и сплавов. Проведен анализ радиопоглощающих конструкций, разработаны широкополосные модульные экраны и поглотители электромагнитного излучения и исследованы их частотные характеристики. Обуждены возможности применения новых материалов и конструкций для экранирования побочных электромагнитных излучений информационных устройств и изделий электронной техники, подавления негативного влияния электромагнитного поля.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, композиционные радиопоглощающие материалы, эффективность экранирования.

Введение

Естественный электромагнитный фон, обусловленный влиянием в первую очередь электромагнитного поля Земли и излучениями космических объектов, наиболее значимым из которых является Солнце, присутствовал на протяжении долгих лет развития человека. В результате человеческий организм, являющийся сложной адаптивной системой, выработал собственные механизмы защиты, которые, однако, зачастую недостаточны при одновременном воздействии естественного и искусственного фона и сложной экологической обстановки [1]. Несмотря на то что излучение космических объектов в значительной степени ослабляется атмосферой, наблюдается негативное воздействие интенсивного солнечного излучения, например, в ультрафиолетовой области длин волн при больших углах падения, отмечается повышенная чувствительность некоторых групп людей к возмущениям электромагнитного поля Земли и солнечным бурям.

Активное использование электромагнитного ресурса, связанное с развитием радиосвязи и различных систем передачи и дистанционной обработки информации, телевидения, мобильной связи, радиолокации и радионавигации, приводит к появлению дополнительного электромагнитного фона. Электромагнитные поля (ЭМП) различной частоты используются в качестве приемо-передающего, управляющего или энергетического канала, разделенного во времени и по частоте с помощью радиотехнических устройств, и локализованного в пространстве с помощью антенных устройств и экранов.

Электромагнитное излучение радиочастотного диапазона, формируемое радиоэлектронными средствами, отличается от естественного фона по своим частотным и мощностным характеристикам и вносит дополнительный вклад в реакцию биологических объектов. Зачастую реакции биообъектов трудно предсказуемы и носят комплексный характер [2,3].

При этом особо актуальной проблемой является подавление нежелательных (паразитных) электромагнитных излучений, возникающих из-за несовершенства конструкций излучающих блоков, оказывающих наиболее сильное влияние на человеческий организм вследствие незначительного удаления от источников излучения и образующих дополнительный электромагнитный канал утечки информации [2]. Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов обуславливается не только проблемами биологического воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) [4], а также и высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники, устройств защиты информации и военной техники.

Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы

При разработке конструкций экранов или поглотителей электромагнитных волн используются различные материалы, обладающие способностью отражать или поглощать электромагнитные излучения в определенном диапазоне частот. Следует отметить, что в природе не существует ни идеально отражающих, ни идеально поглощающих электромагнитную энергию материалов, поэтому подавление ЭМИ чаще всего обеспечивается за счет обоих процессов [5].

Способность среды поглощать электромагнитное излучение определяется ее электрическими и магнитными свойствами, к которым относятся удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости. Эти характеристики используются при описании процесса распространения электромагнитной волны и в общем случае являются нелинейными, тензорными, комплексными величинами. Поглощение электромагнитной энергии происходит за счет диэлектрических, магнитных потерь и потерь на проводимость, которые пытаются максимизировать для достижения максимума эффективности экранирования [5,6]. Отражение электромагнитных волн происходит на любых неоднородностях в материале, а при конструировании экранов определяется различием волновых сопротивлений среды распространения волны и экрана [6]. Довольно часто используют рассеивание плоского фронта ЭМВ на различных неоднородностях структуры радиопоглощающего материала или конструкции для достижения более полного поглощения электромагнитной энергии и уменьшения уровня отраженного сигнала.

Сложный механизм распространения электромагнитных волн и поглощения ЭМИ, а также технологические сложности синтеза материалов с заранее заданными электромагнитными свойствами в широком диапазоне частот обуславливают большое разнообразие существующих экранирующих материалов и покрытий (рис. 1), основное деление которых можно провести по их элементному составу и микроструктуре. По фазовому составу материалы можно разделить на гомогенные и гетерогенные, т.е. состоящие из одной или двух фаз и более [7]. Гомогенные материалы отличаются изотропностью свойств вследствие однородности структуры и в соответствии с электромагнитными свойствами подразделяются на проводящие, магнитные и диэлектрические. Наиболее яркими представителями гомогенных экранирующих материалов являются металлы, обладающие высокой проводимостью, а некоторые из них (такие, как металлы подгруппы железа) — еще и магнитными свойствами. Эксплуатационные свойства металлических материалов могут изменяться путем использования различных сплавов, представляющих собой твердые растворы.

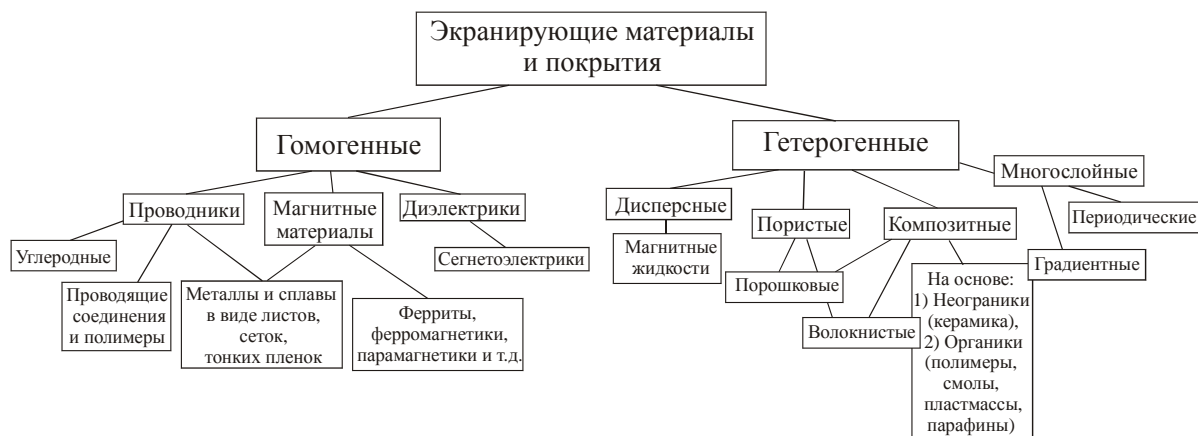


Рис. 1. Классификация экранирующих материалов

Металлические экраны известны уже давно и широко используются. Они отличаются высокой эффективностью на радиочастотах, которая увеличивается при повышении частоты падающего ЭМИ, и технологически выполняются в виде сплошных и перфорированных листов, сеток и могут быть нанесены в виде тонкопленочных покрытий. Однако металлические экраны обладают одним существенным недостатком, связанным с их высокой электропроводностью: высоким коэффициентом отражения, обусловленным большим различием волнового сопротивления свободного пространства и экрана. Кроме того, эффективность таких экранов очень сильно зависит от качества и надежности монтажа электрических контактов, при нарушении которых появляются области переизлучения электромагнитной волны. В свою очередь, эффективность перфорированных и сетчатых экранов падает с повышением частоты, что также ограничивает область их применения (табл. 1) [5].

Таблица 1. Сравнительные характеристики эффективности экранирования, в дБ, сетчатых и металлических экранов с различными параметрами

Вид экрана	Материал экрана	Частота, кГц				
		10	100	1000	10000	100000
Металлические листы толщиной 0,5 мм	Сталь	64	87	120	120	120
	Медь	67	70	88	120	120
	Алюминий	65	66	80	120	120
Металлические сетки	Медь, проволока диаметром 0,1мм ячейки размером 1×1 мм	65	55	50	42	32
	Сталь, проволока диаметром 0,1мм ячейки размером 1×1 мм	48	47	42	36	29,5

Для экранирования электромагнитного поля за счет отражения ЭМВ могут применяться и другие проводящие электрический ток материалы, такие, как углеродные волокна, проводящие полимеры и т.д. Недостатки таких экранов аналогичны недостаткам экранов, изготовленных из металлов и сплавов [5].

Явление отражения ЭМИ при использовании проводящих экранов довольно часто оказывает отрицательное влияние, связанное с формированием переотраженной волны, которая воздействует на экранируемый объект, вызывая изменение его параметров. Это обуславливает необходимость учитывать параметры экрана при разработке радиоэлектронных устройств, а также принимать специальные меры по защите биологических объектов [8]. Поэтому особое внимание уделяется разработке экранов и покрытий, эффективность которых достигается за счет поглощения электромагнитных излучений.

В конструкциях поглощающих ЭМИ экранов и покрытий используются явления рассеивания ЭМВ потери на проводимость при использовании проводящих материалов, а также магнитные и диэлектрические потери в среде, прямо пропорциональные значениям относительной диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости материала. В идеальном случае величины ϵ и μ должны быть максимизированы и равны между собой, чтобы уменьшить уро-

вень отраженной волны. Для получения поглотителей ЭМВ используются ферриты, ферромагнитные материалы и диэлектрики [9]. Также ведутся разработки новых радиопоглощающих покрытий на основе сегнетоэлектриков, однако их эффективность еще невысокая, и они далеки от практического использования [10].

В связи с развитием технологии получения композиционных материалов, свойства которых могут варьироваться в широких пределах путем подбора материала связующего и наполнителя, особое внимание уделяется гетерогенным радиопоглощающим средам. Материалы для поглотителей ЭМИ получают методами порошковой металлургии и с использованием технологии композиционных материалов. В качестве исходного сырья применяются неорганические порошки и волокна, закрепленные в связующем на основе неорганических (оксидов алюминия, титана и др.) или органических (смолы, полимеры, пластмассы, парафины) материалов [5,6]. Такие материалы обладают как высокой эффективностью экранирования, так и большим значением коэффициента поглощения ЭМВ, однако часто их применение ограничено узким частотным диапазоном. Последние исследования в области разработки композиционных материалов направлены на расширение частотного диапазона электромагнитных экранов и получение многофункциональных конструкций [11]. Использование дисперсных растворов с управляемыми магнитными свойствами также представляется перспективным, однако еще далеко от практического применения из-за сложности синтеза, низкой технологичности, относительно невысокой стабильности или токсичности существующих магнитных жидкостей.

Одним из способов повышения эффективности поглощения ЭМВ является использование многослойных материалов, представляющих собой либо симметричные структуры, полученные чередованием слоев с одинаковыми электромагнитными характеристиками, либо градиентные материалы, в которых слои располагаются с увеличением электрических и магнитных потерь по мере удаления от границы раздела экран – свободное пространство, что позволяет улучшить согласование волнового сопротивления экрана с волновым сопротивлением среды распространения ЭМИ. В симметричных многослойных материалах подавление волны происходит за счет многократного переотражения ЭМИ внутри экрана. Градиентные материалы могут быть выполнены в виде или многослойных структур, или с непрерывным изменением параметров материала по глубине, причем параметры обращенной к источнику ЭМИ поверхности экрана подбираются таким образом, чтобы обеспечить необходимые отражающие характеристики, а общая эффективность определяется в основном свойствами материала внутри экрана.

Существующее многообразие материалов используется в различных сочетаниях в конструкциях экранов и поглотителей ЭМИ [5], число и функциональное назначение которых весьма велико. Следует отметить, что в большинстве случаев для обеспечения необходимых коэффициентов отражения и подавления ЭМВ требуется жесткая фиксация конструкции экрана, причем его параметры критически зависят от формоустойчивости конструкции и способа монтажа. Отдельным классом выделяются гибкие конструкции электромагнитных экранов, для изготовления которых должны использоваться материалы, обладающие, кроме заданных электромагнитных свойств, еще и определенными механическими характеристиками. Гибкость конструкции чаще всего обеспечивается за счет использования гибкой основы или связующего в композиционных материалах, в то время как подавление ЭМИ происходит за счет взаимодействия излучения с материалом наполнителя. Особый интерес представляет использование волокнистых материалов, отличающихся, с одной стороны, улучшенными механическими характеристиками и гибкостью, а с другой — позволяющих реализовать более высокую эффективность поглощения за счет использования особенностей распространения ЭМВ в волокнистых средах. Последние разработки в области конструирования гибких электромагнитных экранов и поглотителей ЭМИ, основанные на использовании оборудования легкой промышленности, показали их перспективность и высокую эффективность в СВЧ диапазоне [12-15].

Применение трикотажной технологии для изготовления электромагнитных экранов

При конструировании и изготовлении экранов из волокнистых материалов несомненным преимуществом является высокая технологичность таких изделий, которая совместно с высокой производительностью современного вязального оборудования и относительно невы-

сокой стоимостью как исходного сырья, так и процесса производства, обуславливает перспективность использования технологии машинного вязания полотен (трикотажа) для создания гибких конструкций экранов и поглотителей ЭМИ. Особенности трикотажной технологии позволяют создавать конструкции с повышенной прочностью, износостойкостью, воздухопроницаемостью и другими технологическими и эксплуатационными преимуществами.

Готовое полотно образуется соединением петель, полученных из нитей. Вид переплетения трикотажа определяется формой, размерами, расположением петель и связями между ними и является одним из наиболее существенных факторов, характеризующих структуру трикотажа и его свойства. От вида переплетения зависят прочность, растяжимость, упругость, толщина, вес полотна и ряд других механических и физических его свойств. Переплетения разделяются на две большие группы по распределению нити в полотне: основовязанный, когда нить прокладывается вдоль петельного столбика, и кругловязанный (кулирный), когда нить прокладывается вдоль петельного ряда (рис. 2). Каждый из способов создания полотна имеет свои недостатки и преимущества и подбирается в зависимости от требований, предъявляемых к готовому изделию.

Трикотажная технология характеризуется большим разнообразием возможных переплетений, позволяющих создавать полотна с объемными и пространственно-распределенными рисунками в широком интервале размеров и толщин. Преимущества технологии машинного вязания заключается в возможности формирования определенной пространственной структуры в едином технологическом цикле, в то время когда для тканых или нетканых полотен необходимо введение дополнительных технологических операций.

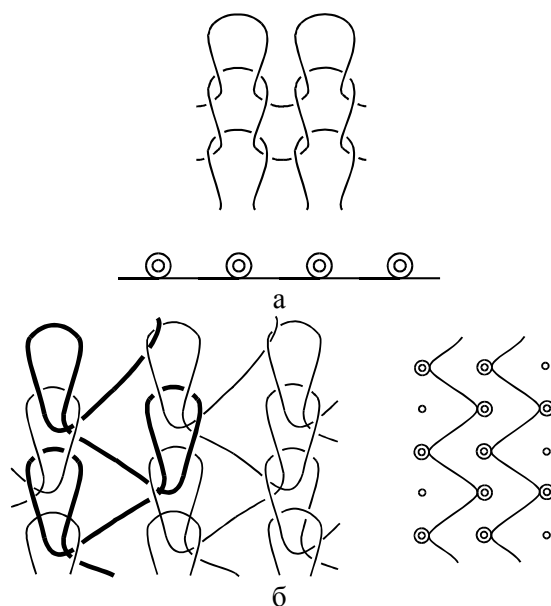


Рис. 2. Особенности строения основовязаного (а) и кругловязаного (б) трикотажных полотен

Использование металлических нитей для создания проводящих структур

Одним из наиболее широко распространенных технологических решений создания гибких электромагнитных экранов и защитной одежды является использование в структуре полотен материалов, обладающих высокой проводимостью и эффективностью экранирования: металлов. Металлические рисунки могут формироваться различными способами, такими, как использование металлических порошков, дисперсных металлосодержащих паст, красок и т.д., однако наиболее простой метод изготовления экранирующих материалов — формирование проводящих структур с помощью металлических проводников в виде комплексных нитей (рис.3) или микропровода.

Пространственная конфигурация проводящего материала в полотне формируется прокладыванием его вместо одной или нескольких нитей, заправленных в нитеводы трикотажной

вязальной машины. Этот способ используется для изготовления полностью металлических сеток, которые применяются в качестве отражающих элементов конструкций экранов, а также антенной техники [16], однако такие конструкции недолговечны при многократном изгибании.

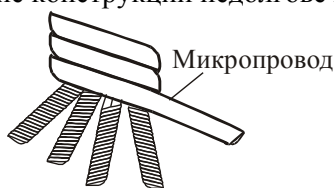


Рис. 3. Получение комплексной нити введением микропровода

Исследования экранов связаны с измерением эффективности экранирования (\mathcal{E}), т. е. с измерением напряженности электрической и магнитной составляющей электромагнитного поля в одной и той же точке экранируемого пространства до и после установки экрана. При этом для выяснения механизма подавления ЭМИ часто необходимо проводить измерения коэффициента отражения ЭМВ. Методика измерений и используемое оборудование в различных диапазонах частот имеют отличия, связанные с особенностями распространения радиоволн. Если в диапазоне частот до 1 ГГц измерения эффективности экрана проводятся по электрической и магнитной составляющей ЭМИ, то в СВЧ диапазоне частот удобно использовать измерители S-параметров четырехполюсников, позволяющие получать необходимую информацию об эффективности экрана, его отражающих и поглощающих свойствах.

Допущения, связанные с пренебрежением незначительным затуханием электромагнитного излучения в свободном пространстве (воздухе) по сравнению с ослаблением излучения материалом экрана, позволили использовать упрощенную методику измерения эффективности, при которой модуль коэффициента прямой передачи пассивного четырехполюсника $|S_{21}|$ принимается в качестве оценки эффективности экрана.

Для определения электромагнитных характеристик гибких полотен из различных материалов проводили измерения общей эффективности экранирования, а также коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения. Образцы материалов помещали между излучателем и приемником и измеряли напряженность электромагнитного поля или плотность потока энергии до и после установки экрана на пути ЭМИ в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМВ, учитывая преобразование фронта волны из сферического в плоский. Результаты измерений носят усредненный по всей поверхности полотна характер и сглаживались для исключения шумовых выбросов, обусловленных особенностями измерительного оборудования. Кроме того, производилась оценка коэффициентов отражения и поглощения электрической и магнитной составляющих поля в диапазоне частот от 0,1 до 1000 МГц.

Установлено, что трикотажные полотна с микропроводом подавляют ЭМИ радиочастотного диапазона в основном за счет отражения электрической составляющей электромагнитного поля, что соответствует теоретическим представлениям о принципе действия сетчатых металлических экранов.

Максимальное значение эффективности экранирования в радиочастотном диапазоне не превышает 30 дБ (рис. 4) вне зависимости от материала используемого микропровода, а применение таких материалов ограничено достаточно узкой полосой рабочих частот, в которой характеристики достаточно стабильны.

Немонотонная зависимость эффективности сетчатых экранов от частоты обуславливается в первую очередь влиянием индуктивности проводов и емкостными взаимосвязями между ними, что увеличивает реактивную составляющую сопротивления проводников. При повышении частоты вклад реактивного индуктивного сопротивления в общее сопротивление провода оказывается значительно больше активной части. Однако на эффективность экрана дополнительно оказывают влияние уменьшение переходных емкостных сопротивлений между проводами и поверхностный эффект.

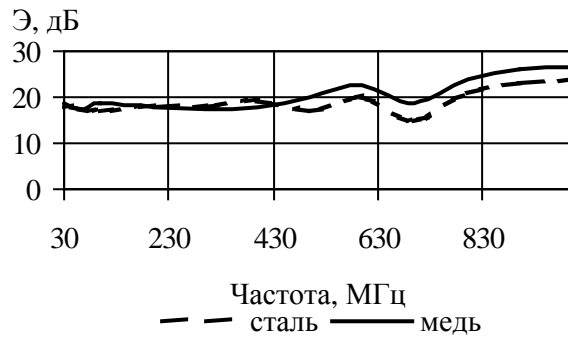


Рис. 4. Эффективность экранов на основе полотен из металлического провода

На СВЧ значительное влияние начинают оказывать геометрические размеры ячеек в сетке и заполненность ее металлическим материалом. При приближении длины волны к размерам отверстий в экране каждое из них становится излучателем, а эффективность сетки стремится к нулю. При этом повышение плотности сеток (уменьшение размеров промежутков между проводниками) позволяет увеличить эффективность экранирования, однако приводит к повышенной материалоемкости и ухудшает механические характеристики экранов.

Наиболее критичным параметром, определяющим экранирующие характеристики полотен с микропроводом, является технология формирования металлического рисунка [17]. При формировании рисунка из металлической нити или микропровода путем провязывания их совместно с ассистирующей нитью из синтетического волокна износостойкость и гибкость трикотажных полотен значительно увеличиваются, однако это негативно сказывается на эффективности таких экранов (рис. 5). При увеличении частоты эффективность таких полотен снижается и применение трикотажных экранов с сетчатой проводящей структурой ограничено.

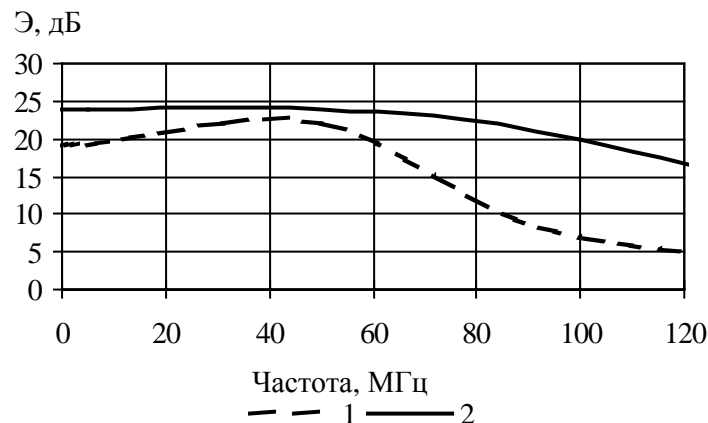


Рис. 5. Зависимость амплитудно-частотной характеристики эффективности экранов от строения полотна: 1 – микропровод провязан совместно с нитью; 2 – микропровод без ассистирующей нити

Синтез композиционных волокон химическим осаждением металлов из водных растворов

Для повышения эффективности и расширения рабочего диапазона частот в конструкциях экранов применяются различные композиционные материалы, обладающие преимуществами металлов с одной стороны и механическими характеристиками синтетических волокон с другой. Одним из перспективных способов создания эффективных радиопоглощающих материалов является использование ультрадисперсных материалов (УДМ) и создание нанокристаллических структур в полимерной матрице, свойства которых зависят еще и от размера морфологических элементов – малых частиц или кристаллитов [18]. Наиболее простыми и технологичными методами синтеза дисперсных частиц служат химические методы, позволяющие путем последовательных реакций получать материалы, проводимость, диэлектрическая и магнит-

ная проницаемость которых зависят от технологии синтеза. При этом обработка материалов может быть осуществлена как на уровне нитей, так и готового полотна в целом.

При выборе осаждаемых материалов необходимо учитывать химические и физические свойства их малоразмерных кристаллов (коррозионную стойкость, стабильность структуры и электрических и магнитных характеристик). С точки зрения обеспечения комплекса необходимых свойств и простоты технологии осаждения предпочтительным является осаждение ферромагнитных металлов подгруппы железа. Из них выбраны никель и кобальт из-за высокой стабильности и коррозионной стойкости, а также радиопоглощающих свойств композиционных волокон на их основе.

Синтез частиц никеля или кобальта происходит по практически одинаковым схемам, так как эти элементы обладают сходной кристаллической структурой, физическими и химическими свойствами. Восстановление протекает путем присоединения недостающих электронов от восстановителя, затем за короткое время атомы металла трансформируются в простейшие кластеры. При формировании кластеров из огромного количества формально возможных и различающихся числом и соотношением ионов и атомов в них образуется несколько комбинаций, соответствующих числу атомов, равному 1, 2, 3, 4, 8 и т.д., что обуславливается наиболее энергетически выгодными параметрами структуры. Особенностью формирования кластеров металлов с незаполненной d-оболочкой, к которым относятся никель и кобальт, является склонность этих металлов образовывать промежуточные и относительно устойчивые металлоорганические соединения.

В настоящее время известно и широко используется несколько технологий химической металлизации диэлектриков, основанных на осаждении металла из водных растворов солей [19]. При химическом осаждении металлов поверхность диэлектрической подложки должна быть подготовлена и каталитически активна, чтобы обеспечить протекание реакций разложения восстановителя и восстановления металла из комплекса. В качестве основы предложено использовать полиакрилонитрильные (ПАН) и целлюлозные волокна, отличающиеся доступностью, невысокой стоимостью и способностью подвергаться модифицированию [20]. Ультрадисперсные частицы в матрице волокон формируются путем химического восстановления металла из раствора с использованием в качестве катализатора палладия или центров металлизации, состоящих из кластеров самого осаждаемого металла.

В результате обработки волокно изменяет окраску и электрическую проводимость, которая возрастает с увеличением количества осаждаемого металла, волокно разрыхляется, имеет развитую поверхность. Электрические свойства материалов обычно характеризуются удельной электрической проводимостью или удельным электрическим сопротивлением. Удельное электрическое сопротивление материалов при содержании никеля 15 мг/см² полотна (17 мас.%) достигает величины $2,5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, но затем увеличивается по логарифмическому закону, что обуславливается взаимодействием кластеров с кислородом окружающей средой (рис. 6). Начальное сопротивление кобальтсодержащих материалов не превышает величины $50 \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Наблюдаемое различие в начальных уровнях электропроводности для материалов, содержащих одинаковое количество никеля или кобальта, объясняется различной степенью дисперсности осаждаемых металлов, что подтверждается результатами электронной микроскопии. Показано, что при осаждении кобальта образуются более мелкокристаллические осадки, обладающие большим электрическим сопротивлением по сравнению с никелем (рис. 7).

Для предотвращения окисления металлических кластеров предложено использовать изоляцию поверхностно-активным веществом (ПАВ), образующим оболочку вокруг защищаемого объекта. Основная идея разработанного метода стабилизации характеристик заключается в замещении кислорода на часть молекулы поверхностно-активного вещества и изоляции зоны реакции окисления от внешнего кислорода. Методика стабилизации кластерной структуры синтезированных материалов включает в себя сушку с последующей обработкой материала водными и неводными растворами высокомолекулярных ПАВ. Проведенные исследования позволили установить, что наиболее эффективной является стабилизация бутиловым спиртом. Герметизация высокомолекулярным маслом также достаточно эффективна, однако полученные образцы имеют более длительный период стабилизации.

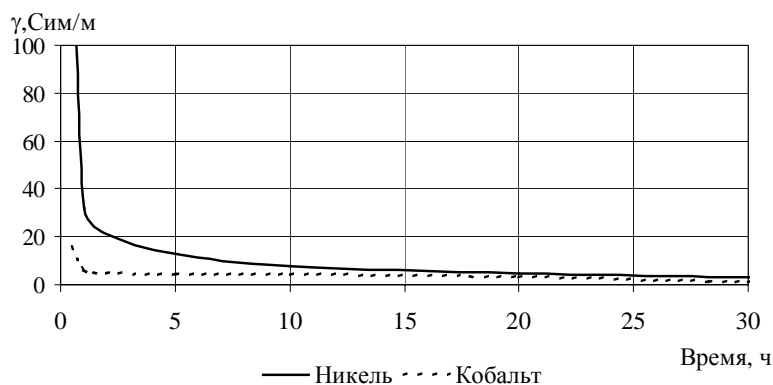


Рис. 6. Зависимость удельной электропроводности синтезированных металл содержащих материалов от времени

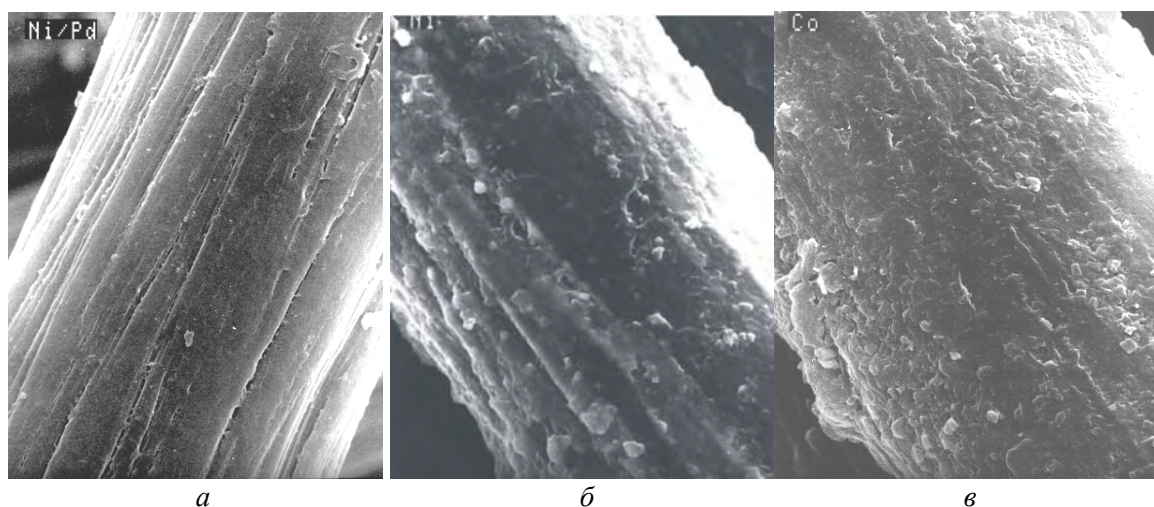


Рис. 7. Внешний вид ПАН волокон с покрытием из никеля, полученным с помощью палладиевой активации поверхности (а), а также с никель- (б) и кобальтсодержащим (в) покрытием, полученным путем сорбции ионов с восстановлением

Экранирующие свойства материалов исследовали в частотном диапазоне от сотен килогерц до сотен гигагерц. Трикотажные полотна из полиакрилонитрила сформированы комбинированным переплетением ластик-производная гладь, а из хлопка – простой гладью. В результате проведенных экспериментов было показано, что никельсодержащие материалы обладают экранирующими свойствами, причем эффективность экранирования повышается с увеличением частоты ЭМИ (рис.8). Эффективность подавления магнитной составляющей ЭМП оказалась не превышающей нескольких децибел, что обусловлено малой толщиной полотна по сравнению с рабочими длинами волн ЭМИ и слабыми магнитными свойствами материалов. В этом случае происходит подавление в основном электрической составляющей ЭМИ, обусловленное большой разницы волновых сопротивлений открытого пространства и материала образцов. При увеличении частоты происходит уменьшение глубины проникновения поля в материал, поэтому проводящие свойства материала определяются сопротивлением поверхностного слоя, но увеличиваются диэлектрические потери, что обуславливает повышение эффективности экранирования. Кроме того, сокращается радиус ближней зоны, что позволяет проводить измерения напряженности ЭМП и в дальней зоне.

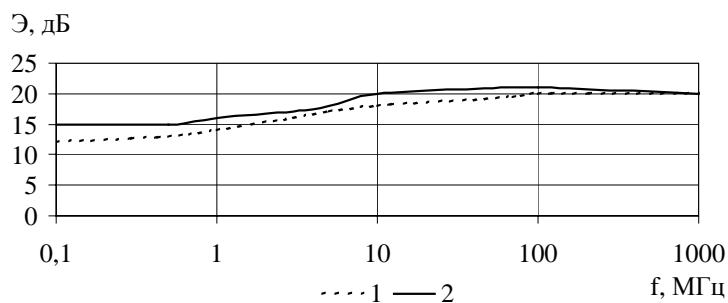


Рис. 8 Эффективность подавления ЭМИ никельсодержащими материалами, синтезированными: по палладиевой методике (1); по сорбционной методике (2)

В диапазоне свыше 1 ГГц для измерений использовали линейку векторных анализаторов цепей. При сравнении характеристик материалов, синтезированных по различным методикам, обнаружена разница в эффективности подавления ЭМИ (рис. 9). Материалы, полученные с использованием палладирования, имеют более высокий коэффициент отражения ЭМИ, обусловленный преимущественной локализацией осажденного металла на поверхности волокон. При этом толщина поверхностного слоя на частоте 1 ГГц не превышает 0,01 мм, а свойства экрана определяются характеристиками границы раздела "воздух-материал экрана".

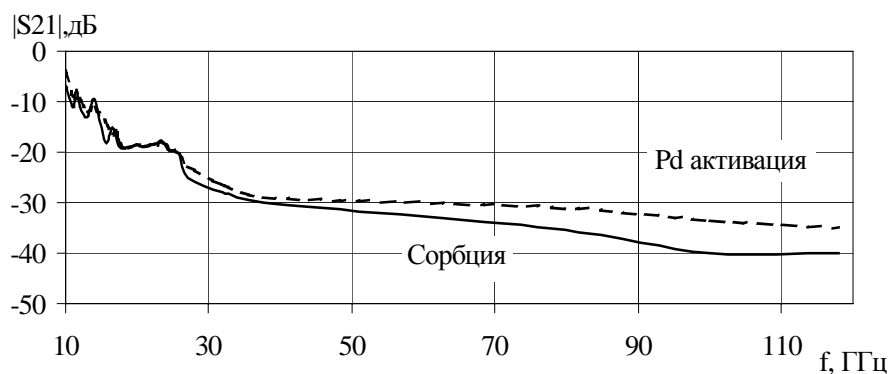


Рис. 9. Коэффициент передачи никельсодержащих полотен

Для кобальтсодержащих материалов эффективность экранирования гораздо ниже и не превышает уровня 20 дБ в диапазоне частот 20-100 ГГц, однако даже гладкие полотна из таких материалов достаточно хорошо согласованы со свободным пространством. Коэффициент отражения кобальтсодержащих материалов не превышает -10 дБ, амплитудно-частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи покрытий из кобальтсодержащих волокон в диапазоне 1-118 ГГц носят нерезонансный характер. Показано, что использование кобальтсодержащих материалов для изготовления согласующего слоя многослойного радиопоглопителя позволяет получать покрытия, эффективность которых достигает 70 дБ.

Вакуумное осаждение металлов на поверхность пористых органических материалов

Получить структуры и покрытия на поверхности волокнистых материалов можно также с помощью технологии вакуумного распыления материалов [21]. Процессы ионно-лучевого и ионно-стимулированного магнетронного распыления являются наиболее перспективными, так как позволяют получать покрытия из металлов, сплавов и диэлектриков с высокой адгезией покрытия к подложке при малых температурных нагрузках. Высокая плотность точечных дефектов и активных центров зародышеобразования приводит к тому, что структура покрытий, полученных методами ионно-лучевого распыления, характеризуется малым размером зерен при повышенной плотности упаковки. Кроме того, технология ионно-лучевого распыления отличается высокой производительностью.

Нанесение покрытия осуществлялось на вакуумной установке ВУ-2Мп, оборудованной двумя двухлучевыми ионными источниками. Перед напылением рабочая камера откачивалась до давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па и затем проводилась ионная очистка поверхности подложки (трикотажного полотна). Пленку Ni получали распылением Ni мишени ионно-лучевым источником при параметрах разряда $U_p=5$ кВ, $I_p=200$ мА, рабочее давление в камере $P=2 \cdot 10^{-2}$ Па. Толщина слоя никеля составляла 0,1 мкм. Полученные покрытия обладают хорошей адгезией к подложке, отличаются стабильностью электрофизических свойств, не деградируют с течением времени.

Трикотажная основа – подложка, на которую наносился никель, производилась на кулрном трикотажном оборудовании по технологической схеме, обеспечивающей формирование полотен с гладкими поверхностными лобовыми слоями и объемной структурой.

Установлено, что электромагнитные свойства гибких экранов на трикотажной основе зависят от толщины и материала нанесенного покрытия, материала, из которого изготовлена трикотажная основа, и технологии нанесения покрытия. Проведенные измерения показали, что электрическое сопротивление нанесенной пленки повышается при увеличении толщины осажденного материала, при толщине покрытия 0,1 мкм поверхностное сопротивление полотен весьма велико и составляет десятки МОм.

При исследовании экранирующих свойств трикотажных полотен комбинированного переплетения ластик-гладь, на лицевую сторону которых было нанесено покрытие, содержащее тонкие слои никеля, было обнаружено уменьшение коэффициента отражения материалов при падении ЭМИ с ненапыленной стороны полотна. Установлено, что при использовании такой конструкции экран отражает в среднем в 1,4 раза меньше электромагнитной энергии, чем в случае установки трикотажного полотна напыленной стороной к источнику (рис.10). При этом отмечено, что эффективность такого экрана повышается незначительно по сравнению с падением электромагнитной волны на лицевую сторону полотна. В диапазоне нижних частот такие экраны имеют низкую эффективность, связанную с тем, что толщина нанесенного покрытия гораздо меньше поверхностного слоя, поэтому сплошные тонкие пленки только частично отражают электрическую составляющую ЭМИ. В этом случае сопротивление покрытий велико, они не проявляют магнитных свойств, благодаря чему не создается большой разницы характеристических сопротивлений свободного пространства и материала экрана, но соответственно уменьшается эффективность. Такие экраны оказываются эффективными в СВЧ диапазоне на частотах, превышающих несколько ГГц.

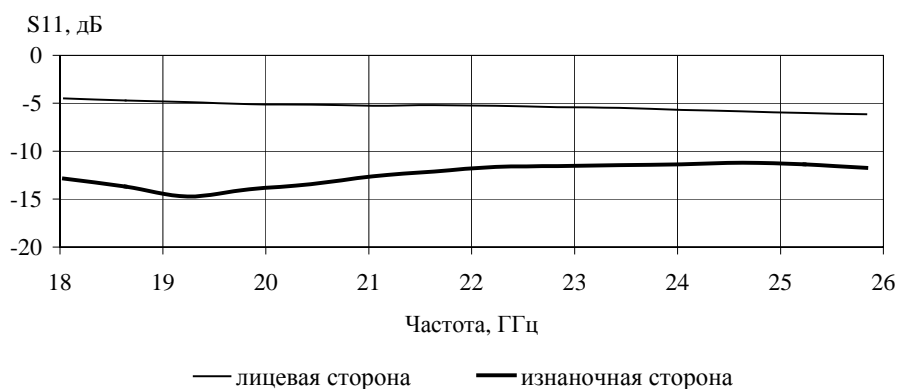


Рис. 10. Коэффициент отражения машинно-вязаных полотен с никелевым покрытием, полученным методом вакуумного распыления

При нанесении металлических покрытий на пористую волокнистую матрицу методом распыления возможно создание градиентной проводящей структуры, позволяющей уменьшить отражение ЭМИ за счет плавного перехода от волнового сопротивления среды распространения ЭМВ к характеристикам металлизированного слоя. Формирование геометрически неоднородной поверхности полотна, на которую наносится покрытие, позволяет дополнительно создавать пространственно-распределенные структуры, содержащие рассеивающие элементы. Применение волокнистых материалов в конструкциях электромагнитных экранов позволяет

получать гибкие модульные покрытия пониженной толщины и массы с анизотропией электрических и магнитных свойств по толщине.

Формирование пористых матриц для фиксации жидких радиопоглощающих материалов

Особым классом радиопоглощающих материалов являются жидкие среды с потерями. Такие среды могут быть реализованы на основе водных или неводных растворов, содержащих добавки для увеличения магнитных и диэлектрических потерь, проводимости, а также улучшения эксплуатационных характеристик готовых изделий. Использование в качестве основы такого вещества, как вода, имеет перспективы, обусловленные ее высокой диэлектрической проницаемостью (около 80) и соответственно диэлектрическими потерями, возможностью введения различных добавок и синтеза частиц из растворимых солей. Кроме того, при эксплуатации экранов необходимо иметь информацию о влиянии факторов окружающей среды, одним из которых является влажность, на их экранирующие и радиопоглощающие характеристики.

Основной проблемой использования жидких сред является пространственная фиксация и стабилизация жидкости, сохранение ее свойств на весь период эксплуатации. Она может быть решена, например, с использованием капиллярного эффекта, фиксирующего жидкость в мало-размерных порах. Пористые волокнистые материалы представляют собой относительно недорогую и технологичную основу для фиксации жидких сред методом пропитки. Они обладают высокой влагоемкостью, которая зависит от материала волокон и конструкции полотна и может варьироваться в широких пределах.

Были разработаны специальные конструкции трикотажных полотен и составы жидких растворов для формирования гетерогенных элементов электромагнитных экранов. Исследования влияния толщины и структуры волокнистой матрицы показали, что рабочий диапазон частот, в котором обеспечивается эффективное подавление ЭМВ, расширяется за счет формирования на поверхности полотен рассеивающих неоднородностей пирамидальной формы (рис. 11).

Изучено взаимодействие электромагнитных волн с машинно-вязаными полотнами комбинированных видов переплетений, пропитанными жидкими средами. В качестве измерительной аппаратуры в диапазоне частот 27-36 ГГц использовался измеритель КСВН панорамный Р2-65 (ГКЧ), а в диапазоне частот 80-115 ГГц - генератор РГ4-14. В обоих частотных диапазонах были задействованы блок индикаторный Я2Р-70 и волноводная измерительная линия с двумя рупорными антеннами.

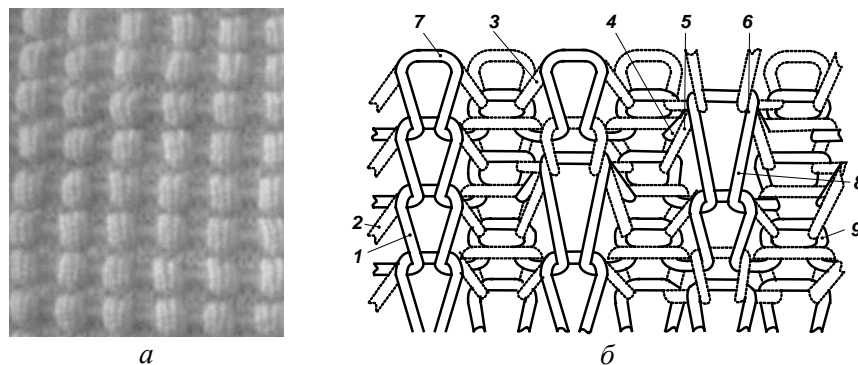


Рис. 11. Структура (а) и внешний вид (б) полотна с псевдопирамидальными неоднородностями на лицевой поверхности

Результаты измерений показывают перспективность использования пропитанных в жидких средах волокнистых пористых материалов для поглощения ЭМИ СВЧ диапазона. Использование пропитки волокон трикотажного экрана водой увеличивает количество поглощаемой в материале энергии ЭМИ и практически не влияет на его отражающие свойства. Машинно-вязанные полотна, пропитанные водой, обеспечивают затухание ЭМИ до 25 дБ, причем поглощающие свойства дистиллированной воды лучше по сравнению с водопроводной, отраже-

ние от которой обусловлено ее проводимостью. Увеличить коэффициент ослабления (более 35 дБ) возможно путем применения растворного наполнителя на основе водных растворов солей с добавками. Использование составного наполнителя для таких материалов позволяет повысить эффективность до 40–45 дБ. Амплитудно-частотные характеристики таких экранов представлены на рис. 12.

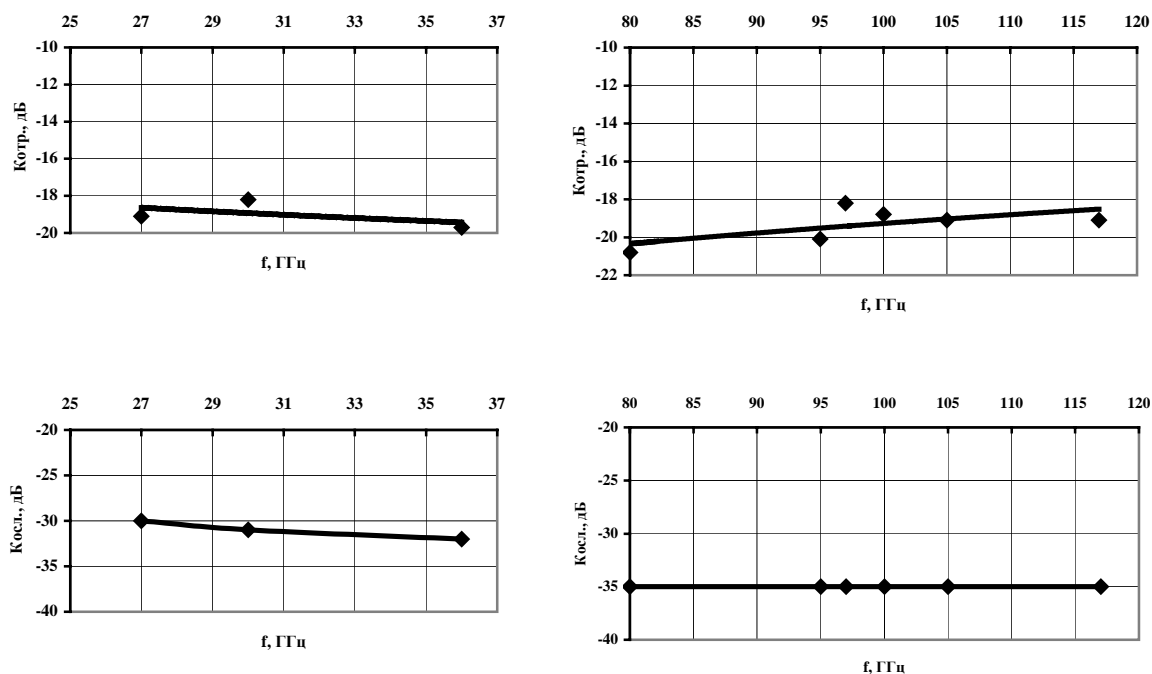


Рис. 12. Коэффициенты отражения и ослабления электромагнитных экранов на основе машинно-вязаных полотен с жидкими средами

Использование различных составов растворных наполнителей позволяет регулировать значение коэффициента отражения для конструкций с геометрическими неоднородностями в пределах 10–26 дБ, а для конструкций с гладкой поверхностью — в диапазоне 8–16 дБ.

Разработка широкополосных поглотителей электромагнитного излучения

Расширение рабочего диапазона частот поглотителей ЭМИ достигают как за счет использования специальных материалов, так и путем применения конструктивных решений. Среди возможных конструкций поглотителей наиболее эффективными и оптимальными с точки зрения массогабаритных характеристик являются многослойные системы. Перспективной является многослойная конструкция с градиентом электрических и магнитных свойств по толщине, каждый последующий слой которой имеет больший коэффициент отражения и более высокую эффективность экранирования ЭМИ. Обычно эффективность таких систем увеличивается с повышением частоты и особое внимание уделяется подавлению низких частот, которое обеспечивается за счет увеличения эффективной толщины покрытия и формирования рассеивающих ЭМВ геометрических неоднородностей на поверхности поглотителя, обращенной к источнику излучения.

Многослойные радиопоглощающие конструкции градиентного типа на основе металлоорганических волокон

Исследовались многослойные трикотажные конструкции, сформированные сшиванием отдельных слоев в виде полотен из композиционных никель- и кобальтсодержащих волокон, полученных на основе полиакрилонитрила или целлюлозы. Конструкция представляла собой два сопряженных полотна, где для сравнения изменялся порядок следования слоев. Сравнение

характеристик конструкций приведено на рис. 13. Полученный вид характеристик связан с особенностями свойств слоев: при падении ЭМИ на границу раздела сред в случае, если в качестве первого слоя выступает полотно из никельсодержащего материала, имеющее высокий коэффициент отражения, происходит значительное отражение электромагнитной энергии от первого слоя. Когда в качестве первого слоя выступает кобальтсодержащий материал с низким коэффициентом отражения, то отражение от границы раздела Co-Ni меньше, чем от границы воздух-Ni, а отраженное излучение дополнительно поглощается кобальтсодержащим слоем. Отмечено, что эффективность многослойной градиентной конструкции выше, чем суммарная эффективность отдельных слоев.

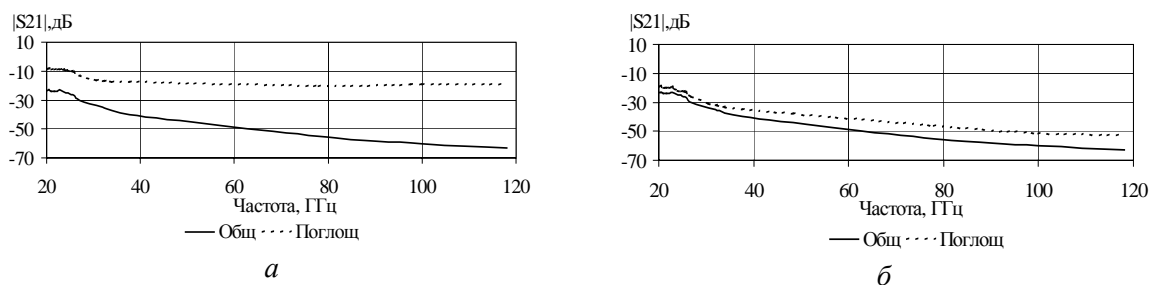


Рис. 13. Характеристики экранов в зависимости от их конструкции: *а* — конструкция с кобальтсодержащим согласующим слоем; *б* — конструкция с никельсодержащим согласующим слоем

На основе полученных данных разработаны многослойные конструкции радиопоглощающих покрытий, где в качестве согласующего слоя выступает трикотажное полотно, обладающее наиболее низким коэффициентом отражения и лучше согласованное со средой распространения ЭМИ. Рабочим слоем является полотно с высокой электропроводностью и эффективностью подавления ЭМИ. Для повышения общей эффективности конструкции дополнительно может вводиться отражающий слой, который возвращает прошедшее через экран излучение. При этом отраженная от последнего слоя энергия дополнительно поглощается в рабочем и согласующем слоях.

Конструкции с рассеивающими неоднородностями на поверхности

Исследование различных конструкций позволило получить поглотитель следующего типа: согласующий слой – кобальтсодержащий ПАН, сопротивление которого 150 Ом·м, коэффициент отражения не хуже –10 дБ в диапазоне частот 18-118 ГГц; рабочий слой – полотно на основе волокон с наноразмерными кластерами никеля или жидкими растворами; в качестве третьего слоя использовано напыление пленки никеля в вакууме. Сопряжение слоев производится путем сшивания их между собой, что позволяет облегчить конструкцию и сохранить ее воздухопроницаемость и гибкость, которая обуславливается гибкостью каждого из слоев. В результате комбинации полотен различной структуры, использования металлоорганических волокон и формирования разноразмерных псевдопирамидальных поверхностных неоднородностей (рис.14) реализованы покрытия общей толщиной несколько сантиметров с эффективностью экранирования ЭМИ до 70 дБ в частотном диапазоне от десятков МГц до сотен ГГц. Линейные размеры, форма и расположение неоднородностей на рассеивающей поверхности зависят от конкретной области применения экранов, используемых материалов и диапазона частот.

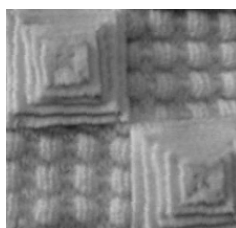


Рис. 14. Фрагмент гибкой модульной конструкции

Разработанные поглотители могут выпускаться в виде отдельных гибких модулей, легко стыкующихся один с другим, а также могут быть реализованы в виде конструкций однократного применения на основе легко утилизируемых волокнистых материалов.

Применение гибких электромагнитных экранов и радиопоглотителей

Гибкие электромагнитные экраны находят широкое применение не только для "классических" целей подавления нежелательных излучений электронной техники, а также актуальны и в других областях, таких, как экологическая защита живых организмов от вредного воздействия электромагнитного излучения, создание одежды и накидок специального назначения, подавление электромагнитного канала утечки информации и защита устройств обработки информации от электромагнитного воздействия. Отдельным направлением является использование таких материалов в военном деле при конструировании и модернизации изделий электроники, а также для снижения заметности объектов и повышения их помехозащищенности. Особое внимание уделяется использованию радиопоглотителей в конструкциях авиационной техники, надводных и подводных кораблей, где большое количество электронной аппаратуры сконцентрировано на ограниченной площади судна. Актуальной проблемой в настоящее время является электромагнитная маскировка наземных объектов с помощью материалов, способных снизить дальность обнаружения подвижных и неподвижных радиолокационных целей в широком диапазоне частот, включая оптический, инфракрасный и радиочастотный. Использование волокнистых материалов позволяет реализовать новые оригинальные устройства и конструкции, не имеющие аналогов в мировой практике.

Заключение

Проблема разработки новых материалов и технологий создания гибких и мобильных электромагнитных экранов с повышенной эффективностью и широкополосностью весьма актуальна, особенно в настоящее время, когда электромагнитные ресурсы широко используются, число действующих радиоэлектронных средств постоянно увеличивается, разрабатываются новые виды электромагнитного оружия, что приводит к обострению проблем экологической защиты живых организмов, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, обеспечения защиты информации, скрытности объектов и др.

Современные электромагнитные экраны и радиопоглотители изготавливаются на основе композиционных высокоэффективных материалов. Рассмотрены перспективные методы изготовления гибких электромагнитных экранов и радиопоглощающих покрытий на основе машинно-вязаных полотен. В качестве сырья для таких полотен предложено использовать волокнистые материалы. Показана возможность использования трикотажной технологии для создания наборных элементов гибких конструкций экранов электромагнитного излучения. Разработана технология формирования упорядоченных геометрических неоднородностей в едином технологическом цикле на поверхности машинно-вязаных полотен с использованием прессовых и комбинированных переплетений.

Описаны методики синтеза волокнистых композиционных никель- и кобальтсодержащих материалов путем химического восстановления ионов металлов из водных растворов с последующей стабилизацией электрофизических свойств синтезированных материалов поверхностно-активными веществами. Рассмотрены их структурные, электрические и микроволновые характеристики.

Разработаны объемные конструкции экранов электромагнитного излучения, содержащие в качестве наборных слоев машинно-вязаные полотна из волокнистых материалов. На основе таких конструкций получены радиопоглотители с коэффициентом отражения до -25 дБ и эффективностью 10-70 дБ в диапазоне частот от десятков МГц до сотен ГГц.

NOVEL MATERIALS FOR ELECTROMAGNETIC SHIELDS

L.M. LYNKOV, V.A. BOGUSH, T.V. BORBOTKO, E.A. UKRAINETS, T.V. KOLBUN

Abstract

New materials and technologies for electromagnetic shields fabrication were presented. Special attention was given to synthesis of composite metalloorganic fibers and application of knitting technology for manufacture of electromagnetic wave absorbers and shields. This paper describes a method of fabrication and properties of the materials on the base of synthetic fibers with nanosize metals and alloys incorporation. We present analysis of radioabsorbers design. The modular broadband electromagnetic absorbers and shields were developed and tested. Possible applications of new materials and structures for shielding of harmful electromagnetic radiation effects and unwanted radiation of electronic devices were discussed.

Литература

1. Асаенко И.С., Валенко В.С., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В. // Междунар. науч.-техн. конф. "Медэлектроника-2002". М., 2002. С. 68-70.
2. Лыньков Л.М., Прищеп С.Л., Богуш В.А., Соловьев В.В. Охрана труда и промышленная экология. Методы и средства экранирования электромагнитного излучения. Мн., 2000. 106 с.
3. Лыньков Л.М., Соловьев В.В., Борботько Т.В. Безопасность эксплуатации источников электромагнитных полей. Мн., 2002. 74 с.
4. Особая роль системы "миллиметровые волны – водная среда" в природе / Н.И. Синицин, В.И. Петросян, В.А. Елкин и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 1. С. 47-51.
5. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П. и др. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Под ред. Л.М. Лынькова. Мн., 2000. 284 с.
6. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М., 1982.
7. Дроздов Н.Г., Никулин Н.В. Электроматериаловедение. М.:Высш. шк., 1973.
8. Богуш В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / Под ред. Л.М. Лынькова. Мн., 2003. 398 с.
9. ГОСТ 30381-95 ССБТ. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические требования. Мн., 2000. 24 с.
10. Пирумов В.С., Алексеев А.Г., Айзикович Б.В. // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. №6. С.2-8.
11. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., Колбун Н.В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2/1. С.92-101.
12. Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А. // Докл. НАН Беларуси. 1999. Т. 43, № 6. С. 106-107.
13. Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А., Борботько Т.В. // Докл. НАН Беларуси. 2002. Т. 46, № 3. С. 120-122.
14. Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А., Прокопович Д.Н. // Радиотехника и электроника. 1999. Вып. 24. С. 102-105.
15. Glybin V., Lynkov L., Bogush V. // Physics, Chemistry and Application of Nanostructure: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'99. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1999. С. 251-254.
16. Боровков В.В., Тимашев А.В. // Теория и практика ресурсосберегающей технологии трикотажного производства и компьютерные методы его технологической подготовки: Тез. докл. конф. М., 1993. С. 21.
17. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Титович Н.А., Петрова В.А. // Изв. Бел. инж. акад. 1997. № 1(3)/3. С. 253-255
18. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П., Селиверстова Т.С. // Материалы, технологии, инструмент. 1998. Т.3, № 2. С. 61.
19. Химическое осаждение металлов из водных растворов / В.В. Свиридов, Т.Н. Воробьева, Т.В. Гаевская, Л.И. Степанова; Под ред. В.В. Свиридова. Мн.: Университетское. 1987. 270 с.
20. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П., Селиверстова Т.С. Патент РБ № 6118.
21. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Завадский С.М., Сеньковец Е.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, № 15. С. 55-60.
22. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Прокопович Д.Н., Петрова В.А. // Изв. Бел. инж. акад. 1999. № 1(7)/2. С. 195-196
23. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Гусинский А.В., Колбун Н.В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 139-141.