

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335

Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ диапазоне

Крюков А.В., Еремеев А.С.

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, <http://www.cnirti.tu/>
Москва 107078, Российская ФедерацияE-mail: minyuc@yandex.ru, eremeewalex@yandex.ru

Поступила 12.10.2020, рецензирована 22.10.2020, принята 28.10.2020

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Проведен комплексный анализ коэффициента поглощения полимерных композитов с немагнитными углеродными включениями в зависимости от их комплексной диэлектрической проницаемости, толщины материала в диапазонных частотах 26-37 ГГц. Экспериментально установлено, что гофрированные поверхности композита приводят к существенному увеличению коэффициента поглощения, а их наполнитель не является основной преградой поглощения, в части возможности улучшения их поглощающих свойств за счет изменения направления структуры матрицы и добавления различных наполнителей при изготовлении СВЧ приборов.

Ключевые слова: композиты на основе углерода, поглотитель, контактная пропитка, поверхностное натяжение жидкости, силы Ван-дер-Ваальса, углеродные нити, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), частотные диапазоны ГГц, модуль упругости, радиопоглощающие материалы (РПМ), СВЧ приборы, пропитка под давлением

УДК 621.37

Для цитирования: Крюков А.В., Еремеев А.С. Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ диапазоне. *РЭНСИТ*, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.

New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and evaluation of their absorbing properties in the microwave range

Anton V. Kryukov, Alexander S. Eremeev

A.I. Berg Institute of Physics and Technology, <http://www.mipt.tu/>
Moscow 107078, Russian FederationE-mail: minyuc@yandex.ru, eremeewalex@yandex.ru

Received October 12, 2020; peer reviewed October 22, 2020; accepted October 28, 2020

Abstract: A comprehensive analysis of the absorption coefficient of polymer composites with nonmagnetic carbon inclusions was carried out depending on their complex dielectric constant, material thickness in the frequency range 26-37 GHz. It has been experimentally established that corrugated composite surfaces lead to a significant increase in the absorption coefficient, and their filler is not the main obstacle to absorption, in terms of the possibility of improving their absorbing properties by changing the direction of the matrix structure and adding various fillers in the manufacture of microwave devices.

Keywords: carbon-based composites, absorber, contact impregnation, liquid surface tension, van der Waals forces, carbon filaments, amplitude-frequency characteristic (AFC), frequency ranges of GHz, elastic modulus, radio absorbing materials (RFM), microwave devices, impregnation under pressure

UDC 535.016

For citation: Anton V. Kryukov, Alexander S. Eremeev New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and evaluation of their absorbing properties in the microwave range. *RENSIT*, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335

СОДЕРЖАНИЕ

1. **ВВЕДЕНИЕ (336)**
2. **ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПОЛНИТЕЛЯ (337)**
3. **ИЗГОТОВЛЕНИЕ НОВОГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ С РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ (338)**
4. **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ (339)**
5. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ (340)**

ЛИТЕРАТУРА (340)

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке модулей СВЧ для их устойчивой работы обычно применяют радиопоглотители, размещаемые в герметичном корпусе модуля (рис.1). Несмотря на существование широкой номенклатуры таких материалов, задача получения неорганического поглотителя остается актуальной [1]. Исследованиям электромагнитных свойств композиционных материалов на основе различных форм углерода посвящено большое количество работ [2,3]. Взаимодействие электромагнитного излучения с нанокремнеземными композитами показывает перспективность их использования для научно-практического применения. Особенно привлекательны композиты с углеродными и нанокремнеземными включениями в качестве поглотителей электромагнитного излучения, для решения ряда практических задач, таких как конструкционные материалы с поглощающими

свойствами в СВЧ диапазоне в корпусах микроэлектроники.

Традиционные экранирующие, поглощающие материалы обычно обладают высокой проводимостью и служат для блокирования, поглощения или перенаправления рассеянного (паразитного) излучения. По мере роста рабочей частоты, длина волны уменьшается, и существующие зазоры между материалом и корпусом ухудшают качество экранирования.

Поглотители позволяют решить проблему экранирования на высоких частотах поглощения рассеянного излучения. Когда речь идет об электронике как потребительской, так и специальной, конструктора стремятся обеспечить как можно большую скорость работы при как можно более широкой функциональности, что требует увеличения количества компонентов, размещенных в как можно более компактных корпусах. Когда большее число компонентов заключено в малые пространства, у разработчиков возникают большие трудности. Такие как несовместимость тех или иных компонентов, необходимость подачи большей мощности, что в частности приводит к возникновению проблем по части ЭМС, вызванных увеличением мощности и высоким уровнем радиопомех. Вследствие всего вышеперечисленного возникают проблемы колебаний ЭМВ в резонаторе. Применение поглотителей СВЧ-энергии помогает решить эти проблемы [4]. Что в полной мере удовлетворяет требования ОСТ

4Г0.010.224-82 «Модули СВЧ интегральные конструирование».

2. ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПОЛНИТЕЛЯ

Как показал проведенный анализ, наибольшее распространение в качестве радиопоглощающих покрытий получили листовые поглотители электромагнитных волн. Их важным преимуществом является возможность совместного использования нескольких листовых слоев с различными характеристиками диэлектрической и магнитной проницаемости, а также разными значениями прохождения и поглощения электромагнитной волны для создания эффекта межслоевого переотражения. Кроме того, используются ферритовые объёмные поглотители, которые благодаря геометрии их построения, обеспечивают максимальное взаимодействие электромагнитных волн с поглощающим слоем за счет переотражения и дифракции на периодических поглощающих структурах. Оба способа показывают существенные характеристики поглощения электромагнитных волн радиодиапазона [6]. Недостатками данных материалов является большая толщина нанесенного покрытия, сложность нанесения на детали сложной

конфигурации (рис. 2). В микроэлектронике в настоящее время в основном используются в качестве поглотителя СВЧ волн материалы, в состав которых входит карбонильное железо, феррит.

Исходя из этого, в задачи исследования входило получение прототипов композиционных радиопоглощающих покрытий, сформированных на основе существующих материалов с использованием полимерного связующего и использование в качестве матрицы, на которую наносился материал углеродной ткани. Кроме того, для повышения поглощающих характеристик, покрытия должны обладать следующими свойствами [7]:

- 1) наличие в полимерной матрице развитой электропроводящей наносети;
- 2) присутствие изолированных друг от друга наночастиц магнитного вещества;
- 3) обеспечение дополнительного ослабления электромагнитного излучения за счет диэлектрических потерь;
- 4) наличие структурных элементов, способствующих образованию релеевских рассеивающих структур и зон, где происходит сложение волн в противофазе;
- 5) достижение минимальной разности волновых сопротивлений на границе радиопоглощающий материал/воздух.

Как известно малые концентрации углеродных включений в композитах позволяют изменить значения комплексной диэлектрической проницаемости

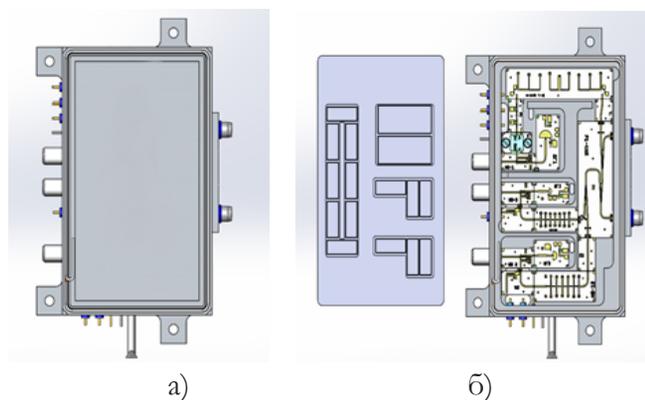


Рис. 1. а) общий вид корпуса СВЧ диапазона, б) с радиочастотными поглотителями на крышке корпуса СВЧ диапазона.

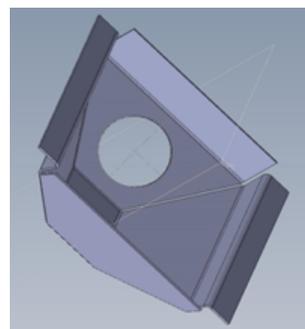


Рис. 2. Ковш.

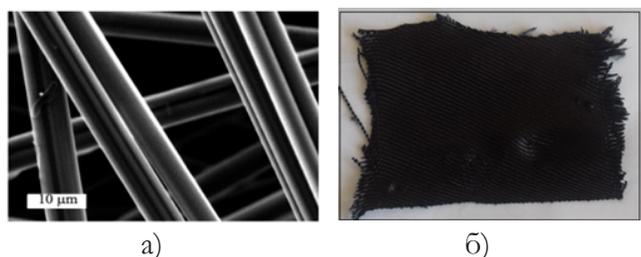


Рис. 3. а) изображение углеродных волокон, входящих в состав углеродной ткани б) ткань УРАЛ-Н-100.

полимерной матрицы и получить материал с контролируемым поглощением [5].

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ НОВОГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ С РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Процесс получения изделия включает в себя несколько этапов. Основным этапом следует выделить пропитку функционального радиопоглощающего наполнителя полимерным связующим. В качестве наполнителя были взяты углеродные нити УРАЛ-Н-100 [8], (рис. 3). Преимущество УВ для поглощающих покрытий заключается в сильной экранировке, вызванной влиянием деполяризации. В композитах на основе нанокристаллических включений необходимо достигать порог перколяции для обеспечения существенного поглощения [3]. При использовании углеродных волокон, обладающих правильной цилиндрической формой и высоким соотношением поперечных размеров, влиянием деполяризации можно пренебречь. Проводимость УВ достаточна велика, но при этом толщина скин-слоя в Ка-зоне превышает диаметр волокон, поэтому они



Рис. 4. Схема пропитки.

взаимодействуют с излучением всем своим объёмом. Это позволяет создать композит с высоким коэффициентом поглощения при концентрации включения ниже порога перколяции.

В качестве связующего использовались два материала: 1) эпоксидная смола марки ЭД-20 ГОСТ 10587-84, с содержанием 0,8-1% (от массы) пропитываемого материала и отвердитель ПЭПА ТУ2413-357-00203447-99; 2) клей-герметик Эласил 137-180 марка Б ТУ 6-02-1214-81. Углеродную ткань пропитывали методом контактного давления (рис. 4). При пропитке данным способом связующее заполняет, главным образом, крупные поры, промежутки между отдельными нитями, а также между элементарными волокнами нитей. Так как по сравнению с величиной молекул связующих веществ величина канальцев элементарных волокон мала, возможность проникновения в эти канальцы пропиточного раствора исключена [9].

Пропитанный материал подвергался сушке при комнатной температуре, после окончательной полимеризации из него вырезались композитные образцы (рис. 5) и изготавливались отверстия для крепления в оправке.

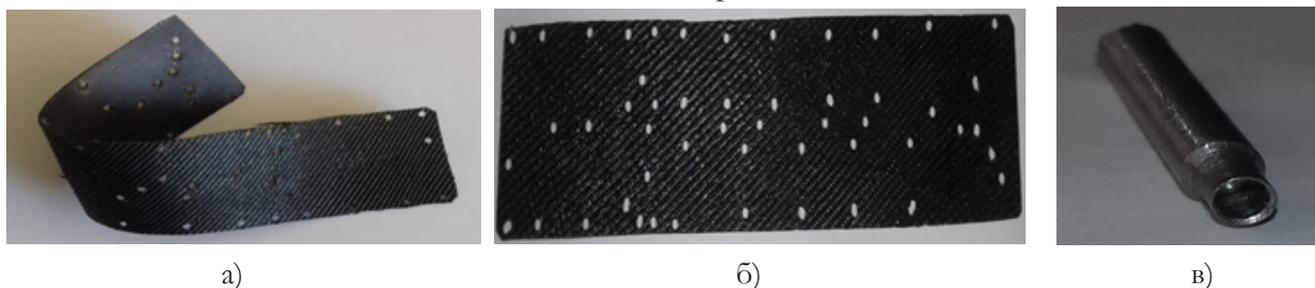


Рис. 5. а) образец пропитанный эласилом, б) образец пропитанный эпоксидной смолой, в) приспособление для вырубки.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытания поглощающего материала проводились на обеспечение электрогерметичности и экранирования твердотельных модулей СВЧ [10]. Углеродная ткань, пропитанная методом контактного давления полимерным связующим, использовалась в качестве прокладки между никелированными корпусом и экранной крышкой модуля, крепёж осуществлялся винтами. Испытания проводились на двух типах СВЧ модулей. Первый представлял широкополосный переключатель мощности 1x2 с усилителем (≈ 20 дБ) в общем тракте. Второй представлял узкополосный генератор шумового сигнала, обеспечивающий формирование и усиление сигнала до требуемого уровня мощности.

На рис. 6 показана развязка плеч переключателя без экранирующих крышек (синий цвет), с установленной экранной металлической крышкой (фиолетовый цвет), с установленной углеродной прокладкой и экранной крышкой (красный цвет). Измерения коэффициента передачи проводились на скалярном анализаторе цепей серии P2M-18A. Применение углеродной прокладки позволило увеличить развязку плеч переключателя

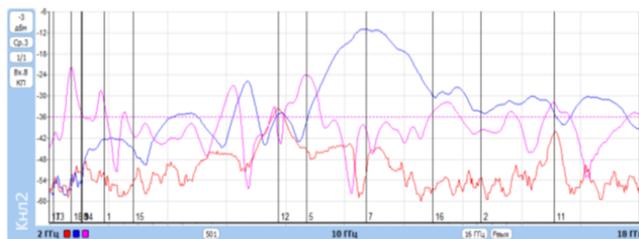
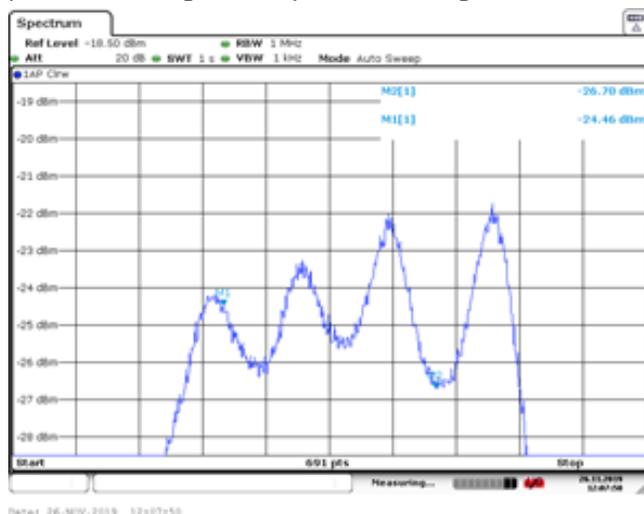


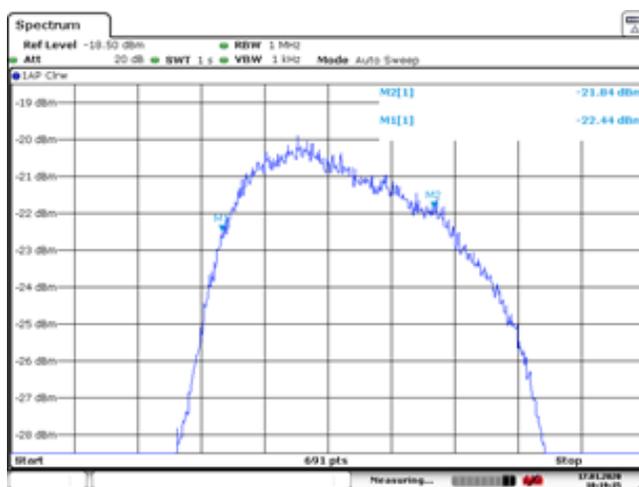
Рис. 6. Развязка переключателя различного конструктива.

в среднем на 10 дБ, что говорит об эффективности использования углеродной ткани в качестве поглощающего материала для обеспечения электрогерметичности модулей СВЧ.

Из-за высокого усиления модуля генератора шума (порядка 110 дБ), устойчивость работы модуля низка и без должного экранирования ведёт к возбуждению. Изрезанность спектра без использования прокладки, с установленной экранной крышкой говорит о недостаточном экранировании модуля (рис.7, вид а). Форма спектра сигнала генератора шума с установленной углеродной прокладкой и экранной крышкой без изрезанности демонстрирует устойчивость работы модуля (рис.7, вид б). Таким образом, обосновано применение углеродной ткани, пропитанной полимерным связующим, в качестве поглощающего материала для экранирования модулей СВЧ.



Date: 26_NOV,2019 12:07:50



Date: 17_JAN,2020 10:33:36

а) б)
Рис. 7. Спектр генератора шума а) без прокладки, б) с прокладкой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что материал на основе углеродной матрицы с различными наполнителями в качестве поглощающего материала позволяет обеспечить внутреннюю и внешнюю электромагнитную совместимость в СВЧ устройствах. Однако остаётся открытым вопрос сохраняемости и долговечности материала. Исследования в этой области ведутся на данный момент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич АЕ, Джуринский КБ, Крылов БВ. Новый радиопоглощающий материал ЖКС и результаты экспериментальной оценки его поглощающих свойств в СВЧ диапазоне. *Материалы между. Крымской конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'1999)*, с 281-282. Севастополь, Вебер, 1999.
2. Qin F, Brosseau C. *J. Appl. Phys.*, 2012, 111(6):061 301-24.
3. Bychanok DS, Kuzhir P, Maksimenko S. et al. *J. Appl. Phys.*, 2013, 113(12):124 103-6.
4. Журнал CUMING MICROWAVE. *J. Appl. Phys.*, 2018, Vol. 86.
5. Быченко ДС, Плющ АО, Горохов ГВ, Быченко ВС. Поглотители СВЧ излучения на основе гофрированных композитов с углеродными волокнами. *Журнал технической физики*, 2016, 86(12):124.
6. Горшенев ВН, Колесов ВВ, Фионов АС, Эрихман НС. Многослойные покрытия с изменяемыми электродинамическими характеристиками на основе наполненных полимерных матриц. *Радиотехника*, 2016, 11:345–354.
7. Wallace JL Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations. *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29(6):4209-4214.
8. Углеродная нить «Урал» (Угленить). <http://cnc.aircraft.by/>.
9. Шугал ЯЛ, Барановский ВВ. *Слоистые пластики*. М., Гос. научно-техн. изд. хим. лит., 1953, с. 50.
10. Зайцева НВ, Перлина ТА. Поглотитель электромагнитных волн. *Патент RUS 2231877*, 30.05.2002.

Крюков Антон Вячеславович

инженер

ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга
20/9, Нов. Басманная ул, Москва, Россия
minuyc@yandex.ru

Еремеев Александр Сергеевич

инженер

ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга
20/9, Нов. Басманная ул, Москва, Россия
eremeewalex@yandex.ru.